

SERIE D Descripción y caracterización de los factores de proyecto

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS



ROM 0.5-05

Recomendaciones Geotécnicas
para Obras Marítimas y Portuarias



MINISTERIO
DE FOMENTO

Puertos del Estado



RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS SERIE 0

Descripción y caracterización de los factores de proyecto

ROM 0.5-05

Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

Noviembre 2005

ÍNDICE GENERAL

	PRÓLOGO	5
CAPÍTULO I	GENERAL	27
CAPÍTULO II	INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	51
CAPÍTULO III	CRITERIOS GEOTÉCNICOS	121
CAPÍTULO IV	ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS	399

ISBN 84-88975-52-X



9 788488 975522



MINISTERIO
DE FOMENTO

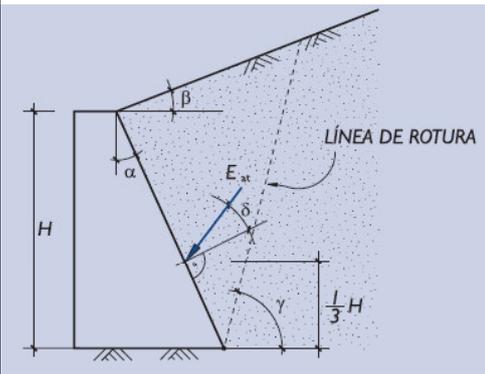
Puertos del Estado

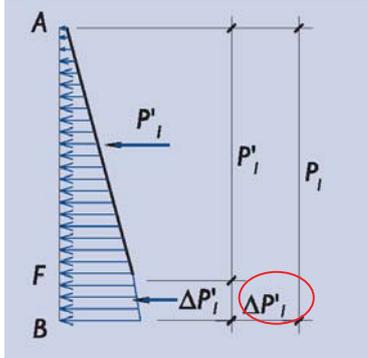
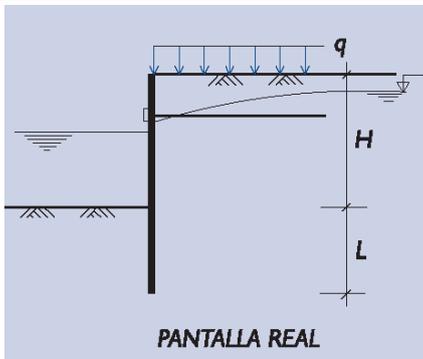
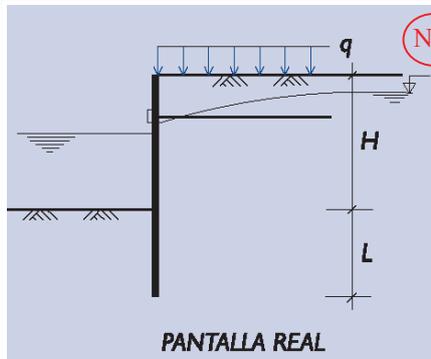


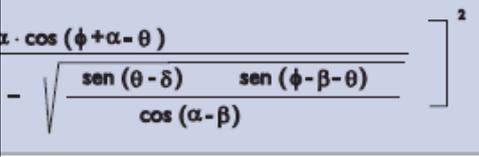
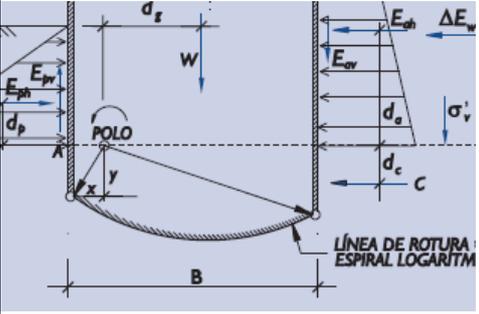
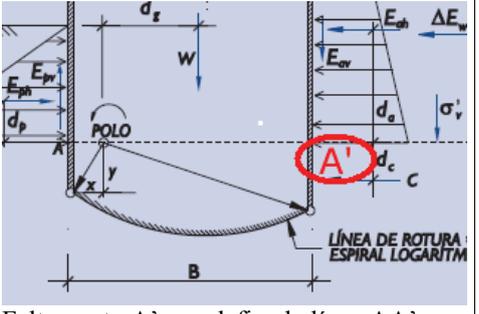
PVP: 50 €

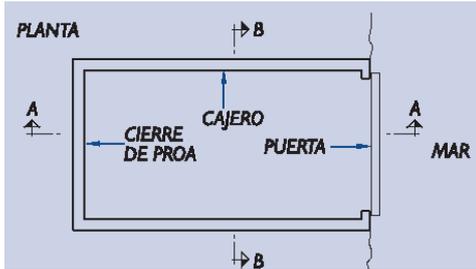
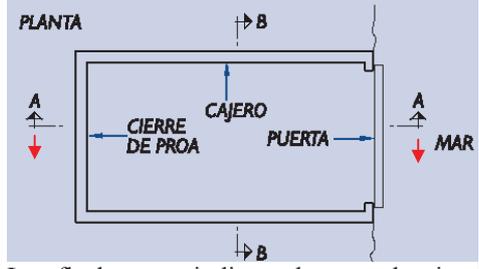
Erratas en ROM-05 05. Octubre de 2007

Página, situación	Dice	Debe decir
33, penúltimo párrafo	y cuando se equiparan las obras de ISA bajo con las de Clase RC2 de los Eurocódigos	y cuando se equiparan las obras de ISA bajo con las de Clase RC1 de los Eurocódigos
56, tabla inmediatamente antes de 2.2.2	Falta una columna a la derecha	Nombre (ejemplo) Arcilla con indicios de limos Arcilla algo limosa Arcilla bastante limosa Arcilla limosa
62, primera fórmula	$s_u = \left(0,11 + 0,3 \cdot \frac{IP}{100} \right) \cdot \sigma'_v \geq 0,15 \sigma'_v$	$s_u = \left(0,2 + 0,3 \cdot \frac{IP - 30}{100} \right) \cdot \sigma'_v \geq 0,15 \sigma'_v$ (Aunque el valor es igual, esta fórmula queda más clara)
68, tras 2ª fórmula	Donde: $\Delta_p =$ $\Delta_e =$	Donde: $\Delta_p =$ $\Delta_e =$ (no es subíndice)
68, última fórmula	$C_c = \frac{LL - 10}{100} \geq 0,10$	$C_c = 0,10 + \frac{LL - 20}{100} \geq 0,10$ (Aunque el valor es igual, esta fórmula queda más clara)
76, tabla 2.4.3	Gravas y arenas con gran contenido de suelos finos (5-10%)	Gravas y arenas con gran contenido de suelos finos (10-20%)
77, cabecera tabla	Resistencia con drenaje C (kPa) ϕ (°)	Resistencia con drenaje c (kPa) ϕ (°)
77, nota (4) pie de tabla	El contenido en finos ... por el tamiz 0,008 UNE.	El contenido en finos ... por el tamiz 0,080 UNE.
85, párrafo en centro de página, antepenúltima línea	... información fehaciente relativa al porcentaje de energía transmitida " h ".	... información fehaciente relativa al porcentaje de energía transmitida η .
87, nota al pie de página	Settlement of Spread Footing	Settlement of Spread Footings ...
94, tercera línea	(PBP, Pre-Boring Pressuremeter)	(PBP, Prebored Pressuremeter)
117, última fórmula	1 UL <> $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s	1 UL \approx $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s
137, Segundo párrafo bajo Nivel III	de los factores de proyecto xi que obedezca	de los factores de proyecto xi que obedezcan
145, Antes del apartado 4.	No se considerará la actuación de acciones excepcionales y, por tanto, las combinaciones accidentales en estados o situaciones de corta duración,	No se considerará la actuación de acciones excepcionales y, por tanto, las combinaciones accidentales, en estados o situaciones de corta duración,
173, 1ª línea	donde τ_{xz} es el esfuerzo de corte en caras	donde τ_{xz} es la tensión tangencial en caras
174, 2ª línea	donde es el vector de módulo unidad dirigido según el eje z.	donde \bar{k} es el vector de módulo unidad dirigido según el eje z.

Página, situación	Dice	Debe decir
179, después de fórmula	v_{crit} = velocidad crítica que indica el proceso erosivo.	v_{crit} = velocidad crítica que inicia el proceso erosivo.
203, fórmula	$\phi_{cálculo} = \frac{1}{2} (\phi_{real} + 45^\circ), \dots$	$\phi_{cálculo} = 45^\circ + \frac{1}{2} (\phi_{real} - 45^\circ), \dots$ (Aunque el valor es igual, esta fórmula queda más clara)
218, sexto párrafo contando por abajo	Para el método de cálculo.....ensayos presiométricosensayos penetrométricos
230, párrafos después de la fórmula	En forma similar..... planos verticales que inscriben al	En forma similar..... planos verticales que circunscriben al
	El contorno lateral..... capaz de inscribir	El contorno lateral..... capaz de circunscribir
238, 2º párrafo	respecto a la cabeza del talud,	respecto a la superficie del talud,
238, antes de 3.6.3.5	que va desde su cabeza hasta	que va desde la superficie del talud hasta
239, después de la fórmula del coeficiente de seguridad	La línea que se indica.... diagrama, se puede calcular como....	La línea que se indica.... diagrama, se puede realizar como....
270, fórmula, centro	$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)$	$T = \left(\frac{EI}{n_h} \right)^{1/5}$ (faltaba exponente 1/5)
274, fórmula, centro	$K_{pandeo} =$	$N_{pandeo} =$
291, últimas fórmulas	$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\sigma + \delta)$ $K_{av} = K_a \cdot \sin(\sigma + \delta)$	$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\alpha + \delta)$ $K_{av} = K_a \cdot \sin(\alpha + \delta)$
293, primera fórmula de 3.7.5.2	$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\sigma + \delta)$	$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\alpha + \delta)$
294, Figura		El ángulo γ debe ser ζ
294, figura, dos últimas fórmulas	$K_a = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$ $\delta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$	$K_a = \operatorname{tg}^2 (\pi/4 - \phi/2)$ $\zeta = \pi/4 + \phi/2$
297, Figura, antes de 3. CÁLCULO	$\sigma_c^* = \sigma_c + \gamma_{ap} \dots$	$\sigma_c^* = \sigma_c + \gamma_{ap} \dots$ (faltan espacios junto al signo más)

Página, situación	Dice	Debe decir
302, arriba	Falta el primer párrafo	En esa figura se indica únicamente el valor de la componente horizontal del empuje unitario y se indica también el proceso de obtención de la resultante horizontal del empuje en cada tramo de muro.
315, figura 3.7.28		Sobra $\Delta P'_i$ (el que está a la derecha)
317 (después de la figura)	El empuje activo... alineación externa	El empuje activo... alineación interna
318, después de la segunda fórmula	donde K_{oh} es	donde K_{0h} es (número cero y no letra o)
318, penúltima lín.	$z_0 =$	$z_0 =$
319, varios lugares	$K_{oh} \dots z_0$	La o del subíndice debe ser el número 0
326 (figura 3.7.34)	W' = pesos efectivos y posibles cargas verticales - S_w = subpresión diferencial (Momento estabilizador) E_w = componente vertical del empuje activo	Sobra el guión delante de S_w
333 (figura 3.7.37)		
335, antes de 3.8 ESTABILIDAD DE TALUDES	Con este tipo de modelos se obtienen no.... en el proyecto estructural. El proyecto estructural de las pantallas... al ingeniero en esos otros análisis.	Estos dos últimos párrafos no deben estar sangrados hacia la derecha, es decir, no pertenecen al apartado f)
347, último párrafo	Cuando se producen roturas mediante ... y son tangentes al fondo resistente.	Este párrafo pertenece a la Nota al pie de Fig. 3.8.5 y no al texto principal. Debe ir sangrado y con letra más pequeña.
355, segundo párrafo	del talud introducen , en general, uno de los dos tipos de fuerzas siguientes:	del talud son , en general, de uno de los dos tipos siguientes:
355, antes de c. Definición de las propiedades	Sería teóricamente infinita para los elementos activos y nula para los pasivos .	Sería teóricamente infinita para los elementos pasivos y nula para los activos .

Página, situación	Dice	Debe decir
361, cuarto párrafo por el final	Esa consideración puede hacerse vía empírica,	Esa consideración puede hacerse por vía empírica,
372, en todo el 3.7.9.1	K = varias veces	k = (minúscula, permeabilidad)
384, 2º párr. De 3.10.4.1.3	son diferentes dependiendo en la naturaleza del suelo	son diferentes dependiendo de la naturaleza del suelo
389, en 3.10.5	Cálculos con modelos numéricos con representación completa del cimiento a. Este cálculo se realiza mediante los siguientes pasos	a. Cálculos con modelos numéricos con representación completa del cimiento Este cálculo se realiza mediante los siguientes pasos
391, centro	Todos los suelos "in situ", sea: vs > 300 m/s a. Todos los suelos, cualquiera ... de profundidad. b. En esos cálculos se correspondiente.	a. Todos los suelos ..."in situ", sea: vs > 300 m/s b. Todos los suelos, cualquiera ... de profundidad. En esos cálculos se correspondiente.
393, segundo párrafo	podrá obtenerse por medio de análisis estático, en los que	podrá obtenerse por medio de análisis estáticos , en los que
396, figura, fórmula final	 <p>Dice: sen (φ - β - θ)</p>	<p>Debe decir: sen (φ + β - θ)</p>
423, cuarto párrafo desde abajo	se considerarán enterrados a cierta profundidad, h, bajo la línea de intersección del talud del muelle	se considerarán enterrados a cierta profundidad, h, bajo la intersección del talud del muelle
424, tras la fórmula	γ _s = peso específico unitario de los elementos de protección.	γ _s = peso específico de los elementos de protección.
457, figura 4.5.8		 <p>Falta punto A' que define la línea AA'</p>
467, último párrafoexiste un esfuerzo de corte horizontal, que puede estimarseexiste un esfuerzo de corte horizontal, Q , que puede estimarse ...

Página, situación	Dice	Debe decir
473, figura 4.6.2		 <p>Las flechas que indican el punto de vista de la sección AA van al contrario</p>
478, última línea	Las constantes de resorte..... indica en 3.6.9	Las constantes de resorte..... indica en 3.6.10
483, penúlt. párrafo	...los valores recomendados por los correspondientes parámetros para cada una de las partes...	...los valores recomendados para los correspondientes parámetros en cada una de las partes...
487, 2º párrafo de 4.7.31	...para los cuales conseguir aumentos de fiabilidad sean poco relevantes en los costes.	...para los cuales conseguir aumentos de fiabilidad sea poco relevante en los costes.
493, título figura 4.7.8	...flujo de agua (Run-Up)	...flujo de agua (Wave run-up)
495, tercer párrafo	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Situación de máximo ascenso del flujo de agua (run-up). ♦ Situación de máximo descenso del flujo de agua (run-down). 	<ul style="list-style-type: none"> ♦ Situación de máximo ascenso del flujo de agua (wave run-up). ♦ Situación de máximo descenso del flujo de agua (wave run-down).
497, último párrafo antes de 4.7.4.5.1	El cálculo del coeficiente de seguridad ... satisfacer el requisito mínimo indicado en la Tabla 4.7.1.	Este párrafo no forma parte del apartado d) Definición de las acciones Por tanto, no debe estar sangrado a la derecha.
503, 3er párrafo de 4.7.5.3	... a partir de dichas leyes de subpresiones dinámicas (ver Fig. 4.7.12).	... a partir de dichas leyes de subpresiones dinámicas (ver Fig. 4.7.13).
516, tercer párrafo de ROCAS	en sus diferentes niveles u horizontales ,	en sus diferentes niveles u horizontes ,
526 (figura 4.9.3)		 <p>Falta 1 en la indicación de la pendiente</p>
527, penúltimo párrafo	su contenido en finos (tamiz 0,008 UNE)	su contenido en finos (tamiz 0,080 UNE)
527, penúltimo párrafo	en los que buena parte del peso esta en tamaños	en los que buena parte del peso está en tamaños

Página, situación	Dice	Debe decir
529, antes de 4.10	<p>♦ La posibilidad de utilización de ... su consolidación.</p> <p>El proceso de sedimentación del ... es hidráulico.</p>	<p>♦ La posibilidad de utilización de ... su consolidación.</p> <p>♦ El proceso de sedimentación del ... es hidráulico.</p>

Detectadas por M.Valderrama, a 17 de octubre de 2007



ROM 0.5-05

Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias

1ª Edición

Noviembre 2005

EDICIÓN:

Puertos del Estado

REDACCIÓN PONENCIA:

Antonio Soriano Peña

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

INGENIERÍA DEL SUELO S.L.

**COORDINACIÓN Y DISEÑO
DE LA PUBLICACIÓN:**

Emilio Piñeiro Díaz

PUERTOS DEL ESTADO

IMPRESIÓN:

V.A. Impresores S.A.

I.S.B.N.:

84-88975-52-X

DEPÓSITO LEGAL:

M-34875-2006

© Puertos del Estado

PRECIO:

50 € (IVA incluido)

Prólogo

El **Programa ROM** vigente, que engloba diversas actividades de estudio y debate orientadas al desarrollo del conjunto de reflexiones sectoriales difundido con las distintas '**Recomendaciones para Obras Marítimas**' sucesivamente editadas, constituye un marco permanente de Normalización técnica en el ámbito de la ingeniería marítimo-portuaria que depende de las Administraciones competentes para Puertos de Interés general del Estado.

Sus objetivos se dirigen a consolidar la importante experiencia española en este campo, a establecer los diferentes estándares de Fiabilidad, Funcionalidad y Operatividad que deban exigirse a los proyectos correspondientes y, en síntesis, a potenciar una mayor calidad para la ejecución de las Obras Portuarias durante todas sus fases, desde las de la planificación, del proyecto y construcción o puesta en servicio hasta las de conservación y posibles reparaciones o desmantelamientos. Sin olvidar su papel como instrumento especializado para el desarrollo y la innovación, tanto en lo que respecta a una introducción de avances tecnológicos recientes cuanto a detectar las necesidades con más relevancia o urgentes de profundización en el conocimiento y, por tanto, de su investigación.

Este Programa normativo de Recomendaciones fue creado en 1987 por el entonces Ministerio de Obras Públicas –a través de la Dirección General de Puertos y Costas– y desde entonces ha desarrollado sus tareas de forma ininterrumpida, en constante evolución, materializando un conjunto de Documentos con amplias aplicaciones que han alcanzado reconocido prestigio estatal e internacional como excelentes herramientas técnicas para el Proyecto y Construcción de las Infraestructuras portuarias.

La sistemática establecida para elaborar los mismos, fruto de unos procesos de discusión prolongada y posterior acuerdo entre distintas posiciones técnicas representadas en el seno del Sector mediante los diversos Grupos de Trabajo –formados por Expertos, redactores con los Ponentes– y el resto de Comisiones amplias para una revisión anticipada desde la perspectiva de los usuarios, ha sido y seguirá siendo la mejor garantía de su rigor y aplicabilidad, al recoger en cada momento de forma contrastada todo el estado del arte y las experiencias aprovechables desarrolladas en definitiva, tanto al nivel práctico como en los teórico-académicos, por la ingeniería portuaria española.

Actualmente, las Publicaciones que incluye el Programa se agrupan en varias ramas temáticas diferenciadas:

- ◆ **Serie 0:** Descripción y caracterización de los factores de proyecto.
- ◆ **Serie 1:** Obras de abrigo frente a las oscilaciones del mar.
- ◆ **Serie 2:** Obras portuarias interiores.
- ◆ **Serie 3:** Planificación, gestión y explotación de las áreas portuarias.
- ◆ **Serie 4:** Superestructuras e instalaciones en tierra.
- ◆ **Serie 5:** Aspectos ambientales de las obras marítimas en el entorno litoral.
- ◆ **Serie 6:** Prescripciones técnicas, administrativas y legales.
- ◆ **Foro E/ROM de debates:** Estudios y análisis técnico-científico sobre las ROM.

La inicial de entre todas ellas, destinada a caracterizar lo referente a **Situación y Factores de Proyecto en las Obras Marítimas o Portuarias**, engloba tanto diversas Recomendaciones aprobadas ya –en los documentos específicos respecto a 'Factores de Uso y Explotación: Acciones en el Proyecto' (ROM 0.2-90), 'Agentes Climáticos I: Oscilaciones del Mar' (ROM 0.3-91), 'Agentes Climáticos II: Procesos Atmosféricos' (ROM 0.4-95) y 'Factores del Terreno: Geotecnia' (ROM 0.5-94), más la última desarrollada sobre 'Procedimiento General y Bases de Cálculo en el Proyecto' (ROM 0.0)- como otras previstas sobre 'Materiales de Construcción' (ROM 0.1), 'Agentes Sísmicos' (ROM 0.6) y 'Sistemas de Medidas e Instrumentaciones' (ROM 0.7), que se encuentran aún en preparación.

Dentro de dicha 'Serie 0' para las Obras Marítimas y Portuarias, ya en el año 1994 se publicaron (bajo la denominación de ROM 0.5-94) unas primeras **Recomendaciones Geotécnicas**. Y tras el periodo transcurrido, después de haber estado en vigor durante más de una década evidenciando gran utilidad e influencia para mejorar los Proyectos portuarios en el ámbito de la geotecnia, se ha considerado necesario revisar y actualizar las mismas para tomar en cuenta tanto resultados de su aplicación y nuevos desarrollos tecnológicos como la más reciente experiencia disponible, al objeto de mantener un texto continuamente alineado con las necesidades y mejores prácticas usuales presentes.

La nueva ROM 0.5-05 consecuente supone, pues, el primer caso finalizado relativo a una revisión ampliada o actualización de alguna de las Recomendaciones para Obras Marítimas editada con anterioridad, al que seguirán asimismo los demás planteados con respecto a otras también ya vigentes.

Su proceso de elaboración ha seguido la metodología habitual establecida en el Programa de estas Recomendaciones normativas, habiendo sido redactada bajo la responsabilidad y supervisada por Puertos del Estado, con participación de las siguientes personas:

- ◆ **Dirección del Programa ROM:**
José Llorca Ortega, *Puertos del Estado*.
- ◆ **Ponente de la ROM 0.5-05:**
Antonio Soriano Peña, *Universidad Politécnica de Madrid*.
- ◆ **Comisiones Técnicas de Trabajo:**
Germán Burbano Juana, *DRAGADOS-ACS*.
Antonio Capote del Villar, *FERROVIAL-AGROMAN*.
Luis Casero Mejías, *INTECOSA*.
Francisco Esteban Lefler, *FCC*.
José Luis Fernández Martín, *Autoridad Portuaria de Sevilla*.
Luis Fort López-Tello, *NECSO*.
Gonzalo Gómez Barquín, *Puertos del Estado*.
Miguel Ángel Gómez Caldito, *ALATEC*.
Ramiro Gómez Escoubes, *IBERINSA*.
Jesús González Galindo, *INGENIERIA DEL SUELO*.
Juan Ignacio Grau Albert, *Puertos del Estado*.
Miguel Ángel Losada Rodríguez, *Universidad de Granada*.
David Marcano Ceballos, *Autoridad Portuaria de Santander*.
Claudio Olalla Marañón, *Laboratorio de Geotecnia del CEDEX*.
Eloy Pita Carpenter, *Puertos del Estado*.
César Sagasetta Millán, *Universidad de Cantabria*.
Carlos Sanchidrián Fernández, *PROES*.
Juan Carlos Suñé Recio, *Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras*.
Javier Uzcanga Salas, *Autoridad Portuaria de Barcelona*.
- ◆ **Presidente del Grupo de Trabajo para la ROM 0.5-05:**
Francisco Esteban Rodríguez-Sedano [† 2006], *Puertos del Estado*.
- ◆ **Coordinación General del Programa ROM:**
Francisco J. González Portal, *Puertos del Estado*.

Los trabajos para sus Grupos de Expertos finalizaron en julio de 2005 con aprobación del Documento por unanimidad entre todos los miembros de la Comisión Técnica ampliada, siendo en consecuencia refrendada por Presidencia de Puertos del Estado en el mes de noviembre del mismo año.

Esta versión de la **ROM 0.5-05 (Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias)** es de destacar, primeramente en relación con la anterior, por haberse adaptado al nuevo Procedimiento General y de Cálculo –en particular a sus requerimientos sobre Seguridad, así como de aptitud para el Servicio y del Uso o la Explotación– que, en la ROM 0.0 (2001), se había establecido con carácter global respecto a las Obras Portuarias. Y, en segundo lugar, por incorporar nuevos contenidos que completan los de la previa a la luz del conocimiento y avances tecnológicos que se han consolidado los últimos años, siendo especialmente remarcable una primera aproximación a las influencias que pueden tener la presencia de Agentes con un carácter dinámico –como los sismos, el oleaje u otras oscilaciones del mar– en el comportamiento de los Suelos saturados y, por tanto, en la verificación de distintos Modos de fallo geotécnicos que afectan a las obras portuarias.

No obstante, una vez actualizada, esta nueva Recomendación mantiene esencialmente la finalidad última de su precedente, que no es otra que conjugar aspectos metodológicos, normativos y tecnológicos con objeto de disponer una verdadera Guía, moderna, completa y exhaustiva, para Ayuda técnica en todo lo referido a los aspectos que inciden, afectan o condicionan a las infraestructuras portuarias desde el punto de vista geotécnico. Por ello se incluyen:

- ◆ Definiciones de planificación y técnicas para la **Investigación geotécnica**.
- ◆ Establecimiento de **Criterios del proyecto** para valores de parámetros geotécnicos, requerimientos exigibles frente a los modos de fallo y métodos en su verificación.
- ◆ **Problemas geotécnicos específicos** en diferentes tipologías de obras marítimo-portuarias, con recomendaciones sobre los métodos de análisis y solución para cada uno de ellos.

Cualesquier comentarios, sugerencias, aclaraciones u otras aportaciones que puedan presentarse acerca del contenido de esta nueva ROM 0.5-05 (cuya versión digitalizada se encuentra disponible desde <http://www.puertos.es>), así como sobre los resultados prácticos de sus aplicaciones, serán bienvenidos con el fin de ser tomados en consideración por futuras Revisiones de la misma. Y podrán remitirse en todo momento a la Coordinación del Programa, dirigiéndolos a programarom@puertos.es.

Índice General

Prólogo	5
CAPÍTULO I. GENERAL	
1.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN	31
1.2. CONTENIDO	31
1.3. CRITERIOS DE SEGURIDAD	32
1.4. CONSIDERACIÓN DE LOS EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES	32
1.5. DEFINICIONES	35
1.6. SISTEMA DE UNIDADES	41
1.7. NOTACIONES	41
1.8. REFERENCIAS DOCUMENTALES	48
CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	
2.1. INTRODUCCIÓN	55
2.2. PROPIEDADES DEL TERRENO	55
2.2.1. Granulometría	55
2.2.2. Índice de poros y porosidad	56
2.2.3. Humedad y grado de saturación	57
2.2.4. Densidades y pesos específicos	57
2.2.5. Plasticidad	58
2.2.6. Permeabilidad	58
2.2.7. Comportamientos drenado y no drenado	59
2.2.8. Resistencia de los suelos	60
2.2.8.1. Parámetros de resistencia en presiones efectivas	60
2.2.8.2. Suelos no saturados	61
2.2.8.3. Resistencia al corte sin drenaje	61
2.2.9. Resistencia de las rocas	62
2.2.9.1. Distancia media entre diaclasas	63
2.2.9.2. Número de fracturas por unidad de volumen	64
2.2.9.3. Persistencia de la fracturación	64
2.2.9.4. Apertura de las litoclasas	65
2.2.9.5. Rugosidad	65
2.2.9.6. Resistencia a compresión simple	65
2.2.9.7. Grado de alteración	66
2.2.10. Deformabilidad del terreno	66
2.2.10.1. El modelo elástico	66
2.2.10.2. El modelo edométrico	67
2.2.10.3. El modelo de Winkler	69
2.2.10.4. Otras formas de considerar la deformación del terreno	69
2.2.11. Otras características	69

2.3. OBJETIVOS Y FASES DEL RECONOCIMIENTO DEL TERRENO	70
2.4. ESTUDIO PRELIMINAR	72
2.4.1. Información preexistente	72
2.4.2. Informe geotécnico preliminar	73
2.4.3. Parámetros geotécnicos preliminares	75
2.5. PROGRAMACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS	77
2.6. RECONOCIMIENTOS GEOFÍSICOS	78
2.7. SONDEOS MECÁNICOS	79
2.7.1. Ejecución de sondeos	79
2.7.2. Profundidad de los reconocimientos	80
2.8. POZOS, CALICATAS Y ZANJAS	83
2.9. ENSAYOS «IN SITU»	84
2.9.1. Ensayo de penetración estándar: SPT	84
2.9.2. Penetrómetros dinámicos	87
2.9.3. Penetrómetros estáticos	89
2.9.4. El piezocono. CPTU	91
2.9.5. Correlación entre ensayos de penetración	93
2.9.6. Presiómetros y dilatómetros	94
2.9.7. Ensayos de molinete	97
2.9.8. Ensayos de placa de carga	97
2.9.9. Ensayos de permeabilidad en sondeos y calicatas	97
2.9.10. Pruebas de campo y otros ensayos «in situ»	97
2.10. TOMA DE MUESTRAS	98
2.11. ENSAYOS DE LABORATORIO	100
2.11.1. Ensayos de identificación de suelos	100
2.11.2. Ensayos de compresión simple de suelos	100
2.11.3. Corte directo de suelos, gravas y escolleras finas	101
2.11.4. Ensayo triaxial de suelos	101
2.11.5. Ensayos edométricos	102
2.11.6. Ensayos de compactación	102
2.11.7. Permeabilidad	103
2.11.8. Ensayos dinámicos	103
2.11.9. Ensayos de rocas	103
2.11.10. Otros ensayos de laboratorio	104
2.12. INTENSIDAD DEL RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO	104
2.12.1. Tipos de reconocimiento	106
2.12.2. Número de puntos de investigación en los reconocimientos detallados	106
2.12.3. Reconocimientos reducidos y mínimos	109
2.12.4. Número de ensayos de laboratorio	110
2.13. INFORME GEOTÉCNICO	111
2.13.1. Anejo de trabajos de campo	111
2.13.2. Anejo de ensayos de laboratorio	112
2.13.3. Memoria	112
2.14. RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA OBRAS O PROYECTOS DE CATEGORÍA A	113
2.14.1. Identificación de diferentes terrenos	113
2.14.2. Parámetros geotécnicos comunes	114

2.14.3.	Variabilidad de los parámetros geotécnicos	115
2.14.4.	Funciones probabilísticas recomendadas	116
2.15.	COSTE DE LOS RECONOCIMIENTOS DEL TERRENO	117
APÉNDICE I. FÓRMULAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN POZOS Y SONDEOS.....		117
A1.1.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN SONDEOS	117
A1.1.1.	Ensayos Lefranc	117
A1.1.2.	Ensayos Lugeon	117
A1.1.3.	Ensayos con carga variable	118
A1.2.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO	119
A1.2.1.	Ensayos en régimen permanente	119
A1.2.2.	Ensayos en régimen transitorio	119
A1.2.3.	Inversión del ensayo de bombeo	120
A1.2.4.	Niveles dentro del pozo	120

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

3.1.	ASPECTOS GENERALES	129
3.2.	CRITERIOS DE SEGURIDAD, SERVICIO Y EXPLOTACIÓN	129
3.2.1.	Fiabilidad frente a los Estados Límite Últimos	130
3.2.2.	Funcionalidad frente a Estados Límite de Servicio	132
3.2.3.	Operatividad frente a los Estados Límite de Parada Operativa	133
3.3.	CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS	133
3.3.1.	Estados Límite Últimos (ELU)	133
3.3.2.	Estados Límite de Servicio (ELS)	134
3.3.3.	Estados Límite de Parada Operativa (ELO)	135
3.3.4.	Métodos de cálculo	135
3.3.5.	Definición de los Estados o situaciones de proyecto	139
3.3.5.1.	Definición de los parámetros geométricos	139
3.3.5.2.	Definición de las propiedades del terreno	141
3.3.5.3.	Definición de las acciones	142
3.3.5.4.	Definición de las combinaciones de acciones y demás factores de proyecto	143
3.3.5.5.	Consideración de Estados o situaciones de corta duración	147
3.3.6.	Coeficientes de ponderación parciales de las acciones	148
3.3.7.	Coeficientes de minoración parciales de las resistencias del terreno	148
3.3.8.	Coeficientes de seguridad	149
3.3.8.1.	Coeficientes de seguridad mínimos	149
3.3.8.2.	Coeficientes de seguridad mínimos asociados con otras probabilidades de fallo	150
3.3.9.	El cálculo con modelos numéricos	150
3.3.10.	La fiabilidad en geotecnia	155
3.3.10.1.	Fuentes de incertidumbre y su medida	155
3.3.10.2.	El cálculo de referencia	158
3.3.10.3.	Estudios de sensibilidad individuales	158
3.3.10.4.	Composición de las sensibilidades individuales	159
3.3.10.5.	Valor centrado del coeficiente de seguridad	159
3.3.10.6.	Cálculo para la combinación cuasi-permanente	159
3.3.10.7.	Cálculo para cada una de las combinaciones fundamentales	160
3.3.10.8.	Cálculo en combinaciones accidentales o sísmicas	161
3.3.10.9.	Índice de confianza y probabilidad de fallo	163
3.3.10.10.	Verificación de la seguridad	164

3.4	FILTRACIONES Y CONSOLIDACIÓN	164
3.4.1.	Problemas geotécnicos más comunes	164
3.4.2.	Dibujo de redes de filtración	165
3.4.2.1.	Terrenos homogéneos e isotropos. Problemas bidimensionales	165
3.4.2.2.	Terrenos anisotropos	166
3.4.2.3.	Terrenos heterogéneos	166
3.4.2.4.	Problemas tridimensionales	166
3.4.3.	Caudales de filtración	166
3.4.3.1.	Problemas bidimensionales, isotropos y homogéneos	166
3.4.3.2.	Terrenos anisotropos	168
3.4.3.3.	Terrenos heterogéneos	168
3.4.3.3.	Problemas tridimensionales	168
3.4.4.	Empujes del agua intersticial sobre estructuras	168
3.4.4.1.	Niveles de las aguas exteriores y de las líneas de saturación en terrenos naturales y rellenos	169
3.4.5.	Fuerzas de arrastre	172
3.4.6.	El problema del levantamiento de fondo	174
3.4.7.	Rebajamiento del nivel freático con pozos	176
3.4.8.	Arrastres de partículas y erosiones internas	177
3.4.9.	Arrastres, socavaciones y otras erosiones externas	179
3.4.10.	Consolidación de masas de suelo	180
3.4.10.1.	Formulación básica	180
3.4.10.2.	Los excesos de presión intersticial	181
3.4.10.3.	Subsidencia creada por los achiques	181
3.4.10.4.	Los asentos de consolidación	183
3.4.11.	Presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del nivel del mar	184
3.4.11.1.	Distribución de presiones intersticiales en fondos marinos	184
3.5	CIMENTACIONES SUPERFICIALES	189
3.5.1.	Tipos de cimentación	189
3.5.2.	Modos de fallo	190
3.5.2.1.	Estados Límite Últimos	190
3.5.2.2.	Estados Límite de Servicio	192
3.5.2.3.	Otros problemas de las cimentaciones superficiales	192
3.5.3.	Características de la cimentación	192
3.5.3.1.	Configuración geométrica	192
3.5.3.2.	Acciones	193
3.5.3.3.	Características del terreno	195
3.5.4.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	195
3.5.4.1.	Métodos de verificación	195
3.5.4.2.	Verificación según la experiencia local contrastada	196
3.5.4.3.	Verificación en función de los ensayos SPT	196
3.5.4.4.	Verificación mediante ensayos presiométricos	198
3.5.4.5.	Método basado en ensayos de penetración estática	199
3.5.4.6.	Métodos basados en otros ensayos de campo	200
3.5.4.7.	Carga de hundimiento en suelos cohesivos firmes y rocas	200
3.5.4.8.	Cálculo analítico de la carga de hundimiento	202
3.5.4.8.1.	Fórmula polinómica	202
3.5.4.8.2.	Factores de corrección	205
3.5.4.8.3.	Cimentaciones superficiales sobre terreno heterogéneo	208
3.5.4.8.4.	Cimentaciones en banqueta sobre suelos cohesivos	209
3.5.4.9.	Seguridad exigible frente al hundimiento	211

3.5.5.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	212
3.5.5.1.	Consideraciones previas	212
3.5.5.2.	Procedimiento de cálculo	212
3.5.5.3.	Seguridad frente al deslizamiento	214
3.5.6.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	215
3.5.6.1.	Vuelco rígido	215
3.5.6.2.	Vuelco plástico	216
3.5.6.3.	Seguridad frente al vuelco plástico	220
3.5.7.	Asientos y otros movimientos de las cimentaciones	220
3.5.7.1.	Zapatas aisladas	220
3.5.7.2.	Cimentaciones corridas	222
3.5.7.3.	Asientos de losas y cargas extensas	222
3.5.7.4.	Asientos admisibles	223
3.5.8.	Consideraciones sobre el proyecto estructural	224
3.6	CIMENTACIONES PROFUNDAS	225
3.6.1.	Aspectos generales	225
3.6.1.1.	Tipos de terreno	225
3.6.1.2.	Tipos de pilote	227
3.6.2.	Modos de fallo más usuales	228
3.6.2.1.	Estados Límite Últimos	228
3.6.2.1.1.	Estados Límite Últimos de tipo geotécnico (GEO)	228
3.6.2.1.2.	Estados Límite Últimos de tipo estructural (STR)	228
3.6.2.2.	Estados Límite de Servicio	229
3.6.2.2.1.	Otras formas de fallo de las cimentaciones profundas	229
3.6.3.	Definición de los factores de proyecto	230
3.6.3.1.	Configuración geométrica	230
3.6.3.2.	Características del terreno	231
3.6.3.3.	Acciones	231
3.6.3.4.	Efectos parásitos	232
3.6.3.4.1.	Rozamiento negativo	232
3.6.3.4.2.	Empujes horizontales causados por sobrecargas verticales de superficie	234
3.6.3.4.3.	Empujes sobre pilotes en talud	236
3.6.3.5.	Efectos de las cargas cíclicas o alternativas	238
3.6.4.	La carga de hundimiento mediante fórmulas estáticas	242
3.6.4.1.	Formulación básica	242
3.6.4.2.	Carga de hundimiento en función del SPT	244
3.6.4.3.	Carga de hundimiento a partir de ensayos de penetración dinámica continuos	246
3.6.4.4.	Carga de hundimiento a partir de ensayos penetrométricos estáticos	246
3.6.4.5.	Carga de hundimiento calculada a partir del presiómetro	246
3.6.4.6.	Cimentaciones con pilotes sobre roca	247
3.6.4.7.	Métodos basados en soluciones analíticas	248
3.6.4.7.1.	Suelos granulares	248
3.6.4.7.2.	Suelos cohesivos	249
3.6.4.7.3.	Suelos cohesivos bajo la punta de los pilotes	250
3.6.4.8.	Pruebas de carga de hundimiento	251
3.6.5.	La carga de hundimiento mediante fórmulas dinámicas	252
3.6.5.1.	Fórmulas dinámicas de la hinca	253
3.6.5.2.	La ecuación de la onda	255
3.6.5.3.	El control de la hinca	257

3.6.6.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	261
3.6.6.1.	Hundimiento individual de un pilote	261
3.6.6.2.	Hundimiento conjunto del grupo	262
3.6.6.3.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al hundimiento	262
3.6.7.	Verificación de la seguridad frente al arranque	263
3.6.7.1.	El pilote individual	263
3.6.7.2.	Consideración del efecto grupo	264
3.6.7.3.	Seguridad frente al arranque	264
3.6.8.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno por tiro o empuje horizontal	265
3.6.8.1.	El pilote individual	265
3.6.8.2.	Consideraciones del efecto grupo	267
3.6.8.3.	Coeficiente de seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	268
3.6.9.	Verificación de los Estados Límite de Servicio	268
3.6.9.1.	Asientos	268
3.6.9.1.1.	Asientos del pilote aislado	269
3.6.9.1.2.	Consideración del efecto grupo	269
3.6.9.2.	Movimientos horizontales y esfuerzos	269
3.6.9.2.1.	Método simplificado	270
3.6.10.	Consideraciones sobre los modos de fallo de tipo estructural	272
3.6.10.1.	Distribución de cargas en grupos de pilotes	273
3.6.10.2.	Resistencia estructural	274
3.7	ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE EMPUJES DE TIERRAS	275
3.7.1.	Tipologías	275
3.7.1.1.	Muros de gravedad	275
3.7.1.2.	Muros pantalla	276
3.7.1.3.	Entibaciones	276
3.7.2.	Valores límites del empuje	276
3.7.3.	Simplificaciones necesarias para el cálculo de empujes	278
3.7.3.1.	Geometría del trasdós del muro	278
3.7.3.2.	Heterogeneidades del terreno	281
3.7.3.2.1.	Relleno en talud	281
3.7.3.2.2.	Relleno en franja estrecha	283
3.7.3.3.	Inclinación de los empujes	283
3.7.4.	Método general de cálculo del empuje activo	284
3.7.4.1.	Geometría del problema	284
3.7.4.2.	Red de filtración	285
3.7.4.3.	Cargas externas	285
3.7.4.4.	Datos del terreno	285
3.7.4.5.	Tramos de cálculo	286
3.7.4.6.	Cálculo del empuje en cada tramo	287
3.7.5.	Métodos basados en el coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.1.	El concepto de coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.2.	Valor del coeficiente de empuje activo	293
3.7.5.3.	Cálculo del empuje efectivo debido al peso del terreno	297
3.7.5.4.	El empuje del agua	298
3.7.5.5.	El efecto de la cohesión	299
3.7.5.6.	El efecto de las sobrecargas	301
3.7.5.6.1.	Sobrecargas verticales uniformes de gran extensión	301
3.7.5.6.2.	Sobrecargas verticales uniformes de extensión limitada	302

	3.7.5.6.3. Sobrecargas verticales lineales o concentradas	303
	3.7.5.6.4. Otras sobrecargas	304
3.7.6.	Método general de cálculo del empuje pasivo	305
	3.7.6.1. Datos necesarios	305
	3.7.6.2. Línea de rotura	305
	3.7.6.3. Cálculo del empuje	306
3.7.7.	Métodos basados en el coeficiente de empuje pasivo	307
	3.7.7.1. El concepto del coeficiente de empuje pasivo	307
	3.7.7.2. Valor del coeficiente de empuje pasivo	308
	3.7.7.3. Cálculo del empuje pasivo	310
3.7.8.	Cálculo del empuje al reposo	312
3.7.9.	Consideración de algunos casos singulares	314
	3.7.9.1. Empuje activo en muros paralelos	314
	3.7.9.2. Pantallas de anclaje enterradas	316
	3.7.9.3. Pilotaje en el trasdós de los muros	316
	3.7.9.4. Efecto silo	318
3.7.10.	Empuje sobre entibaciones	319
3.7.11.	Modos de fallo más usuales de las estructuras de contención	320
	3.7.11.1. Estados Límite Últimos	320
	3.7.11.1.1. Caracterización de las situaciones de proyecto	324
	3.7.11.1.2. Verificación de la seguridad frente al vuelco en los muros de gravedad	325
	3.7.11.1.3. Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en muros pantalla	328
	3.7.11.1.4. Verificación de la seguridad frente al levantamiento del fondo de entibaciones	331
	3.7.11.2. Estados Límite de Servicio	331
	3.7.11.2.1. Movimiento de los muros de gravedad	331
	3.7.11.2.2. Movimiento de los muros pantalla	332
3.8.	ESTABILIDAD DE TALUDES	335
	3.8.1. Introducción	335
	3.8.2. Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite Últimos	336
	3.8.2.1. Pérdida de la estabilidad global	336
	3.8.2.2. Deformaciones	336
	3.8.2.3. Erosiones	336
	3.8.3. Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite de Servicio	336
	3.8.4. El cálculo de la estabilidad global en suelos	338
	3.8.4.1. Tipos de deslizamiento	338
	3.8.4.2. Caracterización de las situaciones de proyecto	339
	3.8.4.3. Principios generales del cálculo	342
	3.8.4.4. Deslizamiento plano indefinido	343
	3.8.4.5. Estudio de deslizamientos circulares	344
	3.8.4.5.1. Método del círculo de rozamiento	344
	3.8.4.5.2. Ábacos de Taylor	346
	3.8.4.5.3. Método de las rebanadas. Líneas circulares	346
	3.8.4.6. Estudio de deslizamientos no circulares	350
	3.8.4.6.1. Método de las rebanadas. Líneas no circulares	350
	3.8.4.6.2. Método de las cuñas	351
	3.8.5. El cálculo de la estabilidad global en rocas	352
	3.8.5.1. Tipos de inestabilidad	353
	3.8.5.2. Caracterización de la situación de proyecto	353
	3.8.5.3. Principios generales de cálculo	356

3.8.6.	Coefficientes de seguridad mínimos frente a la pérdida de estabilidad global	358
3.8.7.	Consideración de las deformaciones	358
3.9.	MEJORA DEL TERRENO	359
3.9.1.	Aspectos generales	359
3.9.2.	Precargas	360
3.9.2.1.	Mejoras producidas por las precargas	360
3.9.2.2.	Tipos de precargas	360
3.9.2.3.	Reconocimientos previos	361
3.9.2.4.	Proyecto de precargas	361
3.9.2.5.	Observación del tratamiento	363
3.9.3.	Vibración profunda	363
3.9.3.1.	Tipos de tratamiento	364
3.9.3.2.	Mejoras alcanzables	364
3.9.3.3.	Procedimientos de control	365
3.9.4.	Compactación dinámica	366
3.9.5.	Compactación con explosivos	368
3.9.6.	Inclusiones rígidas	369
3.9.6.1.	Dimensionamiento de las inclusiones	370
3.9.7.	Inyecciones	372
3.9.7.1.	Inyecciones de impregnación	372
3.9.7.2.	Inyecciones de compactación (Compaction-Grouting)	372
3.9.7.3.	Inyecciones con tubos manguito (Clauage)	373
3.9.7.4.	Inyecciones de alta presión (Jet-Grouting)	374
3.9.8.	Otros procedimientos	374
3.10.	EFFECTOS DINÁMICOS	375
3.10.1.	Consideraciones generales	375
3.10.2.	Comportamiento dinámico sin drenaje	376
3.10.2.1.	Generación de presiones intersticiales	377
3.10.2.2.	Resistencia dinámica sin drenaje	377
3.10.2.3.	Deformaciones bajo la actuación de cargas cíclicas, sin drenaje	379
3.10.3.	Comportamiento dinámico con drenaje	380
3.10.4.	Comportamiento del suelo frente al sismo	382
3.10.4.1.	Caracterización del movimiento sísmico	383
3.10.4.1.1.	Magnitud	383
3.10.4.1.2.	Intensidad	383
3.10.4.1.3.	Aceleración del terreno	384
3.10.4.1.4.	Espectro de respuesta	384
3.10.4.2.	Licuefacción del suelo debido a la acción sísmica	386
3.10.4.3.	Acciones sísmicas transmitidas al terreno de cimentación a través de la estructura resistente	389
3.10.5.	Cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura	389
3.10.5.1.	Cálculo dinámico de la cimentación	391
3.10.5.2.	Cálculo pseudo-estático de la cimentación	392
3.10.5.2.1.	Acciones estáticas equivalentes a la acción del oleaje o del viento	392
3.10.5.2.2.	Acciones estáticas equivalentes a la acción sísmica	393
3.10.5.2.2.1.	Fuerzas estáticas equivalentes sobre los cimientos	394
3.10.5.2.2.2.	Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de modos de fallo de pérdida de la estabilidad global	394
3.10.5.2.3.	Empujes de tierra equivalentes sobre estructuras de contención	394

3.10.5.2.3.1. Empuje activo	395
3.10.5.2.3.2. Empuje pasivo	398
3.10.5.2.4. Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de la estabilidad de taludes	398

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

4.1. INTRODUCCIÓN	405
4.2. MUELLES DE GRAVEDAD	405
4.2.1. El terreno natural. Estudio del cimiento	406
4.2.2. Estudio de materiales	406
4.2.3. Estados Límite Últimos	407
4.2.3.1. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	408
4.2.3.2. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto de la banqueta de apoyo y el terreno natural	409
4.2.3.3. Verificación de la seguridad frente al hundimiento	410
4.2.3.4. Verificación de la seguridad frente al vuelco plástico	411
4.2.3.5. Verificación de la seguridad frente a la estabilidad global	412
4.2.3.6. Verificación de la seguridad frente a la erosión interna del trasdós	412
4.2.3.7. Verificación de la seguridad frente a la socavación del pie del intradós	413
4.2.3.8. Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	415
4.2.4. Estados Límite de Servicio	415
4.2.5. Otras recomendaciones	416
4.3. MUELLES Y PANTALANES DE PILOTES	418
4.3.1. El terreno natural. Estudio del cimiento	418
4.3.2. Elección del tipo de pilote	419
4.3.3. Estudio de los materiales	420
4.3.4. Acciones sobre los pilotes	421
4.3.5. Estados Límite Últimos	422
4.3.5.1. Verificación de la seguridad frente al hundimiento o arranque de los pilotes	422
4.3.5.2. Verificación de la seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	423
4.3.5.3. Verificación de la seguridad frente a la erosión del talud	424
4.3.5.4. Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del talud	424
4.3.5.5. Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	425
4.3.5.6. Verificación de la seguridad frente a las erosiones internas y arrastres	427
4.3.5.7. Verificación de la seguridad frente a las socavaciones	427
4.3.5.8. Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	428
4.3.6. Estados Límite de Servicio	428
4.3.7. Otras recomendaciones	429
4.4. MUELLES DE PANTALLAS	430
4.4.1. Tipología básica	430
4.4.2. Datos del terreno	431
4.4.3. Estudio de materiales	432
4.4.4. Comportamiento estructural	432
4.4.4.1. Tensión en el tirante	432
4.4.4.2. Esfuerzos en la pantalla	433
4.4.5. Estados Límite Últimos	433
4.4.5.1. Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del anclaje	434
4.4.5.2. Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del pie	436

4.4.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en el entorno del anclaje	439
4.4.5.4.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento conjunto	440
4.4.5.5.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	442
4.4.5.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical	443
4.4.5.7.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	444
4.4.5.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	444
4.4.5.9.	Resumen de coeficientes de seguridad mínimos	444
4.4.6.	Estados Límite de Servicio	444
4.4.7.	Otras recomendaciones	445
4.5.	MUELLES DE RECINTOS DE TABLESTACAS	446
4.5.1.	Tipología	446
4.5.2.	Factores de proyecto	448
4.5.2.1.	Datos del terreno	448
4.5.2.2.	Estudio de materiales	448
4.5.2.3.	Niveles de agua	449
4.5.3.	Estados Límite Últimos	449
4.5.3.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	450
4.5.3.1.1.	Cimentaciones superficiales	451
4.5.3.1.2.	Cimentaciones empotradas	452
4.5.3.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	454
4.5.3.3.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	455
4.5.3.4.	Verificación de la seguridad frente a la rotura de la celda	459
4.5.3.5.	Verificación de la seguridad frente a la inestabilidad local del pie	460
4.5.3.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas	463
4.5.3.7.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	465
4.5.3.8.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	465
4.5.3.9.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	465
4.5.3.10.	Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	465
4.5.4.	Estados Límite Últimos del tipo agotamiento estructural	465
4.5.5.	Estados Límite de Servicio	467
4.5.6.	Otras recomendaciones	469
4.6.	DIQUES SECOS Y ESCLUSAS	470
4.6.1.	Clasificación	470
4.6.2.	Reconocimiento geotécnico	471
4.6.3.	Diques secos de gravedad	472
4.6.3.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento del dique debido a las subpresiones	472
4.6.3.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento longitudinal	473
4.6.3.3.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	474
4.6.3.4.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	474
4.6.3.5.	Movimientos	474
4.6.3.6.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.	Diques secos de solera drenada	475
4.6.4.1.	Reducción de subpresiones. Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	476
4.6.4.3.1.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	477
4.6.4.3.2.	Movimientos	477
4.6.5.	Diques secos de solera anclada	477
4.6.5.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento de la solera	477
4.6.5.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	478

4.6.5.3.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	479
4.6.5.4.	Movimientos	479
4.6.5.5.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	479
4.6.6.	Esclusas de navegación	479
4.6.7.	Estudio de la construcción	479
4.7.	DIQUES DE ABRIGO	479
4.7.1.	Tipos de diques	480
4.7.2.	Información geotécnica	483
4.7.2.1.	Reconocimiento del cimientto	483
4.7.2.2.	Estudio de materiales de préstamo	483
4.7.3.	Verificación de la seguridad frente a los modos de fallo de tipo geotécnico	486
4.7.3.1	Elección de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo geotécnico	487
4.7.3.2	Elección del procedimiento de verificación para cálculos de Nivel I	487
4.7.4.	Diques en talud emergido	490
4.7.4.1.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del manto principal	490
4.7.4.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del manto	491
4.7.4.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del espaldón	492
4.7.4.4.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad de la berma	492
4.7.4.5.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global	493
4.7.4.5.1	Estabilización con bermas	495
4.7.4.6.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	496
4.7.4.7.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del núcleo del dique	496
4.7.4.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación del fondo natural	497
4.7.4.9.	Coeficientes de seguridad mínimos	498
4.7.4.10.	Asientos	499
4.7.5	Diques verticales	499
4.7.5.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento horizontal de la estructura	501
4.7.5.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento, la plastificación local y el vuelco plástico	501
4.7.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de la estabilidad global	503
4.7.5.4.	Verificación de la seguridad frente a las socavaciones y erosiones	503
4.7.5.5.	Asientos y deformaciones	503
4.7.5.6.	Coeficientes de seguridad mínimos	504
4.8.	PLATAFORMAS MARINAS (OFF-SHORE)	505
4.8.1.	Tipologías	505
4.8.2.	Acciones del oleaje y del viento	506
4.8.3.	Reconocimientos geotécnicos	507
4.8.4.	Estabilidad del fondo	507
4.8.5.	Cimentaciones superficiales	507
4.8.5.1.	Análisis estático	508
4.8.5.2.	Análisis dinámico	510
4.8.6.	Cimentaciones profundas	511
4.8.6.1.	Estudio de la hinca	511
4.8.6.2.	Carga de hundimiento	512
4.8.6.3.	Carga de rotura horizontal del terreno	512
4.8.6.4.	Deformabilidad	512
4.8.6.5.	Esfuerzos en los pilotes	513
4.9	DRAGADOS Y RELLENOS	513
4.9.1.	Tipos de dragados	513
4.9.2.	Información geotécnica	514

4.9.2.1.	Reconocimiento del terreno	514
4.9.2.2.	Clasificación de los terrenos a dragar	515
4.9.3.	Taludes de dragado	517
4.9.4.	Tipos de relleno	520
4.9.5.	Características de los rellenos	521
4.9.5.1.	Rellenos sumergidos de vertido directo	521
4.9.5.2.	Rellenos hidráulicos	522
4.9.5.3.	Rellenos en seco	523
4.9.6.	Consolidación de los rellenos	524
4.9.6.1.	Asiento de los rellenos generales	524
4.9.6.2.	Procedimiento de observación	524
4.9.7.	Otras recomendaciones	527
4.9.7.1.	Selección de rellenos	527
4.9.7.2.	Precauciones en la realización de dragados	528
4.9.7.3.	Precauciones en la ejecución de los rellenos	528
4.9.7.4.	Estudio de los vertidos	529
4.10	OTRAS OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS	529
4.10.1.	Diques de alba	529
4.10.1.1.	Tipologías	529
4.10.1.2.	Problemas geotécnicos asociados	530
4.10.2.	Instalaciones de botadura e izado	531
4.10.2.1.	Gradas	531
4.10.2.2.	Varaderos	532
4.10.2.3.	Ascensores y cajoneros	532
4.10.3.	Tinglados, almacenes y parques cubiertos	532
4.10.4.	Emisarios y conducciones submarinas	533
4.10.4.1.	Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento	534
4.10.4.2.	Procedimientos de instalación	535

Índice de Figuras

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

Figura 2.2.1.	VARIABLES DE ESTADO MÁS COMUNES	56
Figura 2.9.1.	CORRELACIONES SPT (ARENAS)	86
Figura 2.9.2.	ENSAYO DE PENETRACIÓN DINÁMICA BORRO	88
Figura 2.9.3.	ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁTICA	90
Figura 2.9.4.	CORRELACIONES DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTÁTICA	91
Figura 2.9.5.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO A PARTIR DE LOS RESULTADOS DEL PIEZOCONO CPTU	93
Figura 2.9.6.	GRÁFICO PARA LA DETERMINACIÓN DE c_h A PARTIR DE t_{50} Y UN ÍNDICE DE RIGIDEZ (I_r) ENTRE 50 Y 500 ...	93
Figura 2.9.7.	ESQUEMA DEL RESULTADO DE UN ENSAYO PRESIOMÉTRICO	94
Figura 2.12.1.	NÚMERO DE PUNTOS RECOMENDADOS EN RECONOCIMIENTOS DETALLADOS	109
Figura A1.1.	COEFICIENTES DE FORMA EN EL ENSAYO LEFRANC	118
Figura A1.2.	ENSAYOS DE BOMBEO EN RÉGIMEN PERMANENTE	119
Figura A1.3.	ESQUEMA DEL ENSAYO DE BOMBEO EN RÉGIMEN TRANSITORIO	120

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

Figura 3.3.1.	ESQUEMA DEL PROCESO DE EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD Y LA FUNCIONALIDAD	138
Figura 3.3.2.	POSIBLE ORDENACIÓN DE LOS ESTUDIOS PARAMÉTRICOS (CÁLCULOS DE SENSIBILIDAD)	162
Figura 3.4.1.	FILTRACIÓN SIMPLE EN MEDIOS HETEROGÉNEOS	167
Figura 3.4.2.	SOLUCIÓN SIMPLE. FILTRACIÓN BAJO UN MUELLE	167
Figura 3.4.3.	SOLUCIÓN DE UNA EXCAVACIÓN Y UN ACHIQUE CON ENTIBACIÓN	169
Figura 3.4.4.	ESQUEMA DE UNA RED DE FILTRACIÓN Y DE LAS FUERZAS DE ARRASTRE CORRESPONDIENTES (RÉGIMEN LAMINAR)	174
Figura 3.4.5.	SOLUCIÓN DE LA FILTRACIÓN AL INTERIOR DE UN RECINTO TABLESTACADO	175
Figura 3.4.6.	ESQUEMA DEL PROBLEMA DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL	180
Figura 3.4.7.	ESQUEMA DEL PROBLEMA DE CONSOLIDACIÓN UNIDIMENSIONAL (CONTINUACIÓN)	182
Figura 3.4.8.	INCREMENTO DE LA PRESIÓN SOBRE EL FONDO DEBIDO AL OLAJE POR UN TREN DE ONDAS PROGRESIVO EN PROFUNDIDADES INDEFINIDAS (TERRENO RÍGIDO E IMPERMEABLE)	185
Figura 3.4.9.	RED DE FILTRACIÓN INSTANTÁNEA CORRESPONDIENTE A LA ACCIÓN DEL OLAJE SOBRE UN FONDO MARINO HOMOGÉNEO E ISÓTROPICO	186
Figura 3.4.10.	ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA LEY DE PRESIONES INTERSTICIALES DEL FONDO MARINO PARA SITUACIÓN DRENADA BAJO LA ACCIÓN DEL OLAJE U OTRAS OSCILACIONES DEL MAR (DE ROUCK, 1991)	188
Figura 3.5.1.	ALGUNAS FORMAS TÍPICAS DE CIMENTACIÓN	191
Figura 3.5.2.	GEOMETRÍA DE LA CIMENTACIÓN EQUIVALENTE	193
Figura 3.5.3.	CIMENTACIÓN RECTANGULAR EQUIVALENTE A OTRA CIRCULAR CON CARGA EXCÉNTRICA	194
Figura 3.5.4.	GEOMETRÍA DEL POSIBLE HUNDIMIENTO	202
Figura 3.5.5.	CIMENTACIONES EN ZONAS DE PENDIENTE	208
Figura 3.5.6.	SOLUCIÓN APROXIMADA EN TERRENOS HETEROGÉNEOS	209
Figura 3.5.7.	ESQUEMA DE LA ROTURA DE UNA BANQUETA GRANULAR APOYADA SOBRE UN SUELO BLANDO SIN DRENADO ...	210
Figura 3.5.8.	COMPROBACIÓN DEL VUELCO PLÁSTICO	217
Figura 3.5.9.	MOVIMIENTO DE ZAPATAS AISLADAS Y CONSTANTES DE RESORTE PARA CÁLCULOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA	221
Figura 3.5.10.	FÓRMULAS DEL MÉTODO DE STEINBRENNER	223
Figura 3.6.1.	PRINCIPALES TEMAS A CONSIDERAR EN CIMENTACIONES PROFUNDAS	225
Figura 3.6.2.	ALGUNAS NOTACIONES RELATIVAS AL PILOTE AISLADO	231
Figura 3.6.3.	ESQUEMA DE CÁLCULO DEL ROZAMIENTO NEGATIVO	234

Figura 3.6.4.	Esfuerzos horizontales. Sobrecargas sobre terrenos blandos	235
Figura 3.6.5.	Procedimientos de estimación de empujes sobre pilotes en talud	237
Figura 3.6.6.	Evaluación de la seguridad de un pilote con carga axial cíclica	239
Figura 3.6.7.	Procedimientos de cálculo para la carga de hundimiento	244
Figura 3.6.8.	Hinca de pilotes. Fórmula de Hiley	254
Figura 3.6.9.	Modelo discreto de la ecuación de la onda	256
Figura 3.6.10.	Resistencia a la penetración de un pilote obtenida del control dinámico de la hinca	259
Figura 3.6.11.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	261
Figura 3.6.12.	Esquema de cálculo de la fuerza horizontal de rotura	266
Figura 3.6.13.	Rotura horizontal del terreno: suelos granulares (Broms)	266
Figura 3.6.14.	Rotura horizontal del terreno: suelos puramente cohesivos (Broms)	267
Figura 3.6.15.	Representación simplificada de la parte enterrada de un pilote	271
Figura 3.7.1.	Tipologías básicas de estructuras de contención	275
Figura 3.7.2.	Esquema de la relación entre empuje y movimiento	277
Figura 3.7.3.	Sustitución de un trasdós quebrado por un plano vertical equivalente	279
Figura 3.7.4.	Paramento virtual equivalente en muros de trasdós quebrado	279
Figura 3.7.5.	Trasdós equivalente en muros en L	280
Figura 3.7.6.	Expresión gráfica de la Ley de Variación de la inclinación del empuje	281
Figura 3.7.7.	Esquema de algunas heterogeneidades típicas	282
Figura 3.7.8.	Esquema del método general de cálculo del empuje activo	287
Figura 3.7.9.	Cálculo del empuje activo sobre el tramo AC	288
Figura 3.7.10.	Determinación de la inclinación del empuje	289
Figura 3.7.11.	Extensión del concepto de coeficientes de empuje activo de suelos granulares	292
Figura 3.7.12.	Geometría y solución del problema resuelto analíticamente por Coulomb	294
Figura 3.7.13.	Geometría y solución del problema resuelto por Rankine	296
Figura 3.7.14.	Cálculo de empujes activos horizontales debidos al peso efectivo del terreno	297
Figura 3.7.15.	Cálculo del empuje horizontal del agua	299
Figura 3.7.16.	Efecto de la cohesión en el empuje activo horizontal	300
Figura 3.7.17.	Efecto de una sobrecarga uniforme en el empuje activo horizontal	301
Figura 3.7.18.	Efecto de sobrecargas parciales en el empuje activo horizontal	302
Figura 3.7.19.	Efecto de cargas lineales o concentradas en el empuje activo horizontal	303
Figura 3.7.20.	Efectos de otras sobrecargas	304
Figura 3.7.21.	Esquema del método general del cálculo del empuje pasivo	306
Figura 3.7.22.	Definición del coeficiente de empuje pasivo en suelos granulares	307
Figura 3.7.23.	Teoría simplificada de la plasticidad aplicada al cálculo de empujes pasivos	308
Figura 3.7.24.	Coefficientes de empuje pasivo	309
Figura 3.7.25.	Coefficiente de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales y relleno de trasdós horizontal	310
Figura 3.7.26.	Coefficientes de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales	311
Figura 3.7.27.	Efecto de la cohesión y las sobrecargas en el empuje pasivo	312
Figura 3.7.28.	Empuje activo sobre muros paralelos próximos	315
Figura 3.7.29.	Cálculo del tiro en algunas estructuras discontinuas	316
Figura 3.7.30.	Empujes sobre pilotes en el trasdós de un muro	317
Figura 3.7.31.	Empujes del terreno sobre entibaciones	320
Figura 3.7.32.	Esquema de algunos modos de fallo	321
Figura 3.7.33.	Esquema de algunos modos de fallo estructural	323
Figura 3.7.34.	Comprobación de seguridad frente al vuelco	326
Figura 3.7.35.	Análisis simplificado de una pantalla anclada	329
Figura 3.7.36.	Levantamiento del fondo en excavaciones entibadas	331
Figura 3.7.37.	Esquema de cálculo de pantallas mediante resortes equivalentes	333
Figura 3.8.1.	Esquema de algunos modos de fallo por pérdida de la estabilidad global	337
Figura 3.8.2.	Tipos de deslizamientos en suelos	338
Figura 3.8.3.	Comprobación de seguridad frente al deslizamiento en plano indefinido	344
Figura 3.8.4.	Esquema de cálculo mediante el método del círculo de rozamiento	345
Figura 3.8.5.	Ábaco de Taylor. Suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$	347

Figura 3.8.6.	Ábaco de Taylor. Caso general, $\phi \neq 0$	348
Figura 3.8.7.	Esquema del método de las rebanadas en deslizamientos circulares	349
Figura 3.8.8.	Método de las rebanadas para superficies de rotura no circulares	351
Figura 3.8.9.	Esquema del método de las cuñas	352
Figura 3.8.10.	Tipos de inestabilidades elementales en taludes rocosos	354
Figura 3.8.11.	Procedimiento simplificado de evaluación de la seguridad. Taludes rocosos diaclasados	357
Figura 3.9.1.	Estimación del grado de consolidación de precargas con drenaje acelerado	362
Figura 3.9.2.	Esquema del tratamiento de vibrocompactación	364
Figura 3.9.3.	Esquema de la compactación dinámica	366
Figura 3.9.4.	Esquema del tratamiento con explosivos	368
Figura 3.9.5.	Esquemas de algunos tratamientos de mejora mediante inclusiones rígidas	369
Figura 3.9.6.	Esquemas de algunos tipos de inyección usuales	373
Figura 3.10.1.	Número de ciclos N, necesarios para causar una deformación tangencial del 5%	378
Figura 3.10.2.	Ejemplo típico de resistencia de una arena saturada frente a la actuación de cargas dinámicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)	379
Figura 3.10.3.	Ejemplo típico de parámetros de comportamiento deformacional de un suelo bajo la actuación de cargas cíclicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)	381
Figura 3.10.4.	Isosistas del terremoto de Lisboa de 1755	383
Figura 3.10.5.	Mapa español de peligrosidad sísmica (NCSE-02)	385
Figura 3.10.6.	Ejemplos de espectros de respuesta (amortiguamiento D = 5%)	385
Figura 3.10.7.	Resistencia a la licuefacción	388
Figura 3.10.8.	Esquema de empujes equivalentes sobre una estructura de contención en condiciones sísmicas	395
Figura 3.10.9.	Fórmulas de Mononobe-Okabe	396

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

Figura 4.2.1.	Muelle de bloques	405
Figura 4.2.2.	Muelle de cajones	406
Figura 4.2.3.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de gravedad	407
Figura 4.2.4.	Esquema del deslizamiento por la base de la banquetta	409
Figura 4.2.5.	Métodos simplificados de cálculo de la carga de hundimiento de un muelle de gravedad sobre una banquetta	410
Figura 4.2.6.	Esquema de la acción erosiva de las hélices	414
Figura 4.2.7.	Esquema de una protección antierosiva	414
Figura 4.3.1.	Muelle de pilotes	418
Figura 4.3.2.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes	422
Figura 4.3.3.	Método simplificado de cálculo de estabilidad	426
Figura 4.3.4.	Método de cálculo de la protección de pie del talud mediante escolleros de características granulométricas no uniformes	427
Figura 4.4.1.	Muelle de pantallas	431
Figura 4.4.2.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de pantallas	434
Figura 4.4.3.	Giro alrededor del anclaje	435
Figura 4.4.4.	Giro alrededor del pie	437
Figura 4.4.5.	Definición de la seguridad frente al giro	438
Figura 4.4.6.	Esquema de algunos sistemas de anclaje	440
Figura 4.4.7.	Deslizamiento conjunto	441
Figura 4.4.8.	Situación del punto «C» en otras formas de anclaje	443
Figura 4.4.9.	Seguridad frente al equilibrio vertical	443
Figura 4.5.1.	Muelle de recintos de tablestacas	447
Figura 4.5.2.	Planta esquemática de recintos de tablestacas	447
Figura 4.5.3.	Modos de fallo geotécnicos en muelles de recintos de tablestacas	451
Figura 4.5.4.	Coefficiente de seguridad al deslizamiento en recintos no empotrados	452
Figura 4.5.5.	Coefficiente de seguridad al deslizamiento en recintos empotrados	454

Figura 4.5.6.	Esquema para evaluación de la seguridad frente al hundimiento	455
Figura 4.5.7.	Coficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 1	456
Figura 4.5.8.	Coficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 2	457
Figura 4.5.9.	Espirales logarítmicas para distintos ángulos de rozamiento	458
Figura 4.5.10.	Lugar geométrico de los polos de las espirales logarítmicas	458
Figura 4.5.11.	Coficiente de seguridad frente a la rotura de la celda	459
Figura 4.5.12.	Seguridad frente al levantamiento del terreno en el pie	461
Figura 4.5.13.	Comprobación tensional en el entorno del pie del muelle	463
Figura 4.5.14.	Seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas	464
Figura 4.5.15.	Esquema de los esfuerzos de tracción en las paredes	467
Figura 4.5.16.	Esquema del cálculo simplificado de deformaciones	468
Figura 4.6.1.	Elementos típicos de un dique seco	471
Figura 4.6.2.	Temas asociados al estudio de diques secos	473
Figura 4.6.3.	Posibles esquemas de soleras drenadas	476
Figura 4.6.4.	Posibles esquemas de soleras ancladas	478
Figura 4.7.1.	Dique en talud emergido	481
Figura 4.7.2.	Dique vertical	481
Figura 4.7.3.	Dique mixto	482
Figura 4.7.4.	Dique rebasable y sumergido	482
Figura 4.7.5.	Dique berma	482
Figura 4.7.6.	Diagrama de fallo de un dique vertical asociado a Estados Límite Últimos. Obras de ISA no significativo ($ISA < 5$). Ejemplo simplificado de asignación de probabilidades de fallo, considerando que la probabilidad conjunta de fallo obtenida por criterios de optimización económica es 0,16	488
Figura 4.7.7.	Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques en talud emergidos	491
Figura 4.7.8.	Estabilidad de diques de abrigo. Fuerzas actuantes en situación de ascenso del flujo de agua (Run-up)	493
Figura 4.7.9.	Mejora de la estabilidad global con banquetas	497
Figura 4.7.10.	Modos de fallo geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques de abrigo verticales	499
Figura 4.7.11.	Periodos naturales de oscilación de los diques verticales correspondientes a los modos fundamentales	500
Figura 4.7.12.	Consideración de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en la banqueta y el terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad (Hundimiento y vuelco)	502
Figura 4.7.13.	Consideraciones de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en el interior de la banqueta y del terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global	504
Figura 4.8.1.	Tipologías de plataformas marinas (Off-Shore)	506
Figura 4.8.2.	Modos de fallo típicos de plataformas de gravedad	509
Figura 4.9.1.	Esquema de un dragado en zanja para sustitución de suelos blandos	514
Figura 4.9.2.	Esquema de posibles rellenos junto a un muelle	520
Figura 4.9.3.	Esquema del asiento de los rellenos	526
Figura 4.10.1.	Esquemas para duques de alba	530
Figura 4.10.2.	Esquema para instalaciones de botadura e izado	531
Figura 4.10.3.	Esquema para un parque de almacenamiento cubierto	533
Figura 4.10.4.	Esquema sobre instalación de emisarios submarinos	535

Índice de Tablas

CAPÍTULO I. GENERAL

Tabla 1.4.1.	Eurocódigos. Valores mínimos recomendados del índice de fiabilidad β (Estados Límite Últimos)	33
Tabla 1.7.1.	Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones	41

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

Tabla 2.2.1.	Caracterización de litoclasas (Adaptación de las recomendaciones de la ISRM)	63
Tabla 2.2.2.	Escala de la meteorización de las rocas (ISRM)	66
Tabla 2.4.1.	Símbolos y términos comunes para la descripción preliminar del terreno	74
Tabla 2.4.2.	Algunas características elementales de las rocas sanas que pueden utilizarse para estimaciones previas	76
Tabla 2.4.3.	Algunas características elementales de los suelos que pueden utilizarse para estimaciones previas	76
Tabla 2.6.1.	Resumen de algunos métodos geofísicos utilizados en reconocimientos geotécnicos	78
Tabla 2.7.1.	Algunas formas de realizar sondeos mecánicos	80
Tabla 2.10.1.	Procedimientos habituales de toma de muestras en profundidad	99
Tabla 2.12.1.	Categoría de las obras según los índices IRE e ISA, a los efectos de la definición de la intensidad de los reconocimientos geotécnicos	105
Tabla 2.12.2.	Tipo de reconocimiento recomendado para un proyecto constructivo	106
Tabla 2.12.3.	Número de puntos de investigación en reconocimientos reducidos y mínimos	110
Tabla 2.14.1.	Unidades de referencia recomendadas y valores aproximados del coeficiente de variación de los parámetros geotécnicos para terrenos normalmente homogéneos	116

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

Tabla 3.2.1.	Probabilidad de fallo individual asociada a los métodos de verificación de Nivel I que se adoptan en esta ROM (Estados Límite Últimos). Modos de fallo geotécnicos	132
Tabla 3.2.2.	Máxima probabilidad de fallo individual asociada a modos de fallo funcionales (Estados Límite de Servicio). Modos de fallo geotécnicos	132
Tabla 3.3.1.	Niveles representativos a adoptar para las aguas exteriores en función del tipo de combinación considerado	140
Tabla 3.3.2.	Coefficientes de ponderación parciales de las acciones para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos (ELU). Combinaciones fundamentales	148
Tabla 3.3.3.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados para la verificación de modos de fallos geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos. $5 \leq ISA \leq 19$	149
Tabla 3.3.4.	Algunos valores de β y p	163
Tabla 3.4.1.	Desniveles límite a adoptar entre los niveles representativos de las aguas libres exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos	171
Tabla 3.4.2.	Coefficientes de seguridad mínimos frente al levantamiento de fondo. ISA bajo (5 a 19)	176
Tabla 3.5.1.	Métodos de verificación de la seguridad frente al hundimiento	196
Tabla 3.5.2.	Factor de corrección del índice «N» del SPT por la sobrecarga efectiva de las tierras. $N_{(\text{corregido})} = f \cdot N$	197
Tabla 3.5.3.	Coefficientes de capacidad de carga de la fórmula de Brinch Hansen	203

Tabla 3.5.4.	Coefficientes de seguridad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales. Valores mínimos recomendados para obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	212
Tabla 3.5.5.	Coefficientes de seguridad mínimos frente al deslizamiento horizontal. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	214
Tabla 3.5.6.	Coefficientes de seguridad mínimos frente al vuelco plástico. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)	220
Tabla 3.6.1.	Coefficientes de seguridad, F, mínimos frente al hundimiento de pilotes. Obras con ISA bajo (5 a 19)	263
Tabla 3.6.2.	Coefficientes de seguridad mínimos frente a la rotura horizontal del terreno. Obras con ISA bajo (5 a 19)	268
Tabla 3.6.3.	Valores del parámetro n_h (MPa/m)	271
Tabla 3.6.4.	Factores de reducción de los esfuerzos en la zona enterrada de los pilotes	272
Tabla 3.6.5.	Compresión media máxima en pilotes	274
Tabla 3.7.1.	Valores máximos del ángulo de rozamiento entre el paramento del muro y el terreno, en función del ángulo de rozamiento del terreno, ϕ	284
Tabla 3.7.2.	Valores de K_{ah} según Blum	295
Tabla 3.8.1.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de estabilidad global. Obras de ISA bajo (5 a 19)	358
Tabla 3.9.1.	Ejemplo de posibles mejoras producidas por precargas	360
Tabla 3.9.2.	Aplicabilidad de los tratamientos de vibración profunda a los distintos tipos de terrenos	365
Tabla 3.10.1.	Ejemplos de daños sísmicos en puertos en las últimas dos décadas	386
Tabla 3.10.2.	Valores del parámetro CRR	387
Tabla 3.10.3.	Factor corrector del parámetro CRR en función de la magnitud del sismo (Youd e Idriss, 1997)	387

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

Tabla 4.2.1.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de gravedad. ISA bajo (5 a 19)	416
Tabla 4.3.1.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles y pantalanes pilotados. ISA bajo (5 a 19)	428
Tabla 4.4.1.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de pantallas. Obras de ISA bajo (5 a 19)	445
Tabla 4.5.1.	Coefficientes de seguridad mínimos para muelles de recintos de tablestacas. Obras con ISA bajo (5 a 19)	466
Tabla 4.7.1.	Coefficientes de seguridad mínimos para diques en talud emergidos (con probabilidad de ocurrencia en el modo de fallo del orden de 0,01)	498
Tabla 4.7.2.	Coefficientes de seguridad mínimos para diques verticales (con probabilidad de ocurrencia del modo de fallo del orden de 0,01)	501
Tabla 4.9.1.	Calificación de los suelos a dragar por su compacidad o consistencia	515
Tabla 4.9.2.	Terminología a utilizar para definir el grado de alteración de las rocas	516
Tabla 4.9.3.	Terminología a utilizar en la descripción de la resistencia de la roca matriz	516
Tabla 4.9.4.	Criterios de descripción objetiva del estado de fracturación de la roca	517
Tabla 4.9.5.	Clasificación de macizos rocosos según el valor del índice RQD	517
Tabla 4.9.6.	Taludes de dragado usuales (H/V)	519
Tabla 4.9.7.	Coefficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de estabilidad de taludes de dragado. Obras con ISA no significativo (< 5)	520
Tabla 4.9.8.	Valores típicos de algunas propiedades en rellenos sumergidos recién vertidos	522
Tabla 4.9.9.	Valores típicos para algunas propiedades de rellenos compactados en seco	523
Tabla 4.10.1.	Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento asociados a emisarios y conducciones submarinas	534

Capítulo I

General



Índice Capítulo I

CAPÍTULO I. GENERAL

I.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN	31
I.2. CONTENIDO	31
I.3. CRITERIOS DE SEGURIDAD	32
I.4. CONSIDERACIÓN DE LOS EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES	32
I.5. DEFINICIONES	35
I.6. SISTEMA DE UNIDADES	41
I.7. NOTACIONES	41
I.8. REFERENCIAS DOCUMENTALES	48

1.1 ÁMBITO DE APLICACIÓN

El ámbito de aplicación de las Recomendaciones Geotécnicas para el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.5) se extiende a todas las obras marítimas y portuarias cualquiera que sea su clase o destino, así como los materiales y elementos empleados en su construcción.

A estos efectos, se consideran Obras Marítimas y Portuarias aquellas estructuras, elementos estructurales o movimientos de tierra ubicados en zonas portuarias marítimas o fluviales, o en cualquier otra pertenencia del dominio público marítimo-terrestre, siempre que permanezcan en situación estacionaria en Fase de Servicio, tanto en forma fija como flotante.

Asimismo se considerarán incluidos dentro del ámbito de aplicación de las presentes Recomendaciones aquellos elementos o Fases auxiliares de Construcción que puedan afectar a la seguridad o correcto funcionamiento en Fase de Servicio de estructuras preexistentes que reúnan los requisitos indicados en el párrafo anterior.

1.2 CONTENIDO

Las presentes Recomendaciones reúnen los criterios necesarios para la definición y realización de los trabajos de investigación geotécnica, la elaboración de la información obtenida con dicha investigación, los métodos de análisis de los diversos aspectos de tipo geotécnico y modo de evaluar los parámetros en cada caso y, finalmente, el estudio de los problemas geotécnicos que presentan cada una de las tipologías estructurales más habituales en las obras marítimas y portuarias.

Para cubrir los aspectos geotécnicos relacionados con obras marítimas y portuarias, esta Recomendación ROM 0.5-05 se estructura en cuatro partes:

- ◆ Parte 1. General. Incluye los aspectos generales necesarios para la correcta aplicación y comprensión de la Recomendación: ámbito de aplicación, resumen general de su contenido, definiciones, unidades utilizadas, notaciones y simbología, y documentación de referencia.
- ◆ Parte 2. Investigación geotécnica. Se establecen las distintas etapas que permitirán llegar a definir los valores de los parámetros geotécnicos a emplear en los cálculos y análisis del Proyecto: recopilación de la información previa, planificación y realización de la campaña de reconocimientos (trabajos de campo y ensayos de laboratorio), y redacción del informe geotécnico.
- ◆ Parte 3. Criterios geotécnicos del Proyecto. Se dan recomendaciones generales sobre los métodos de análisis a emplear para evaluar distintas situaciones típicas, así como sobre los márgenes de seguridad a utilizar en cada caso.
- ◆ Parte 4. Problemas geotécnicos en distintas tipologías de obras marítimas y portuarias. Se establecen las situaciones que deben ser analizadas en cada una de las tipologías más habituales en las obras marítimas y portuarias junto con las recomendaciones específicas sobre el método de análisis de cada una de ellas.

Comentario: Las distintas partes de esta Recomendación están relacionadas entre sí. Aunque el orden de presentación elegido sigue la secuencia lógica del proyecto geotécnico, es necesario conocer el texto completo de la Recomendación para aplicar cualquiera de las partes. En particular, para programar un reconocimiento adecuado (Parte 2) es necesario conocer previamente el tipo de problemas a cuya solución habrá de contribuir el reconocimiento geotécnico (Parte 4) así como los métodos de análisis a emplear (Parte 3).

I.3 CRITERIOS DE SEGURIDAD

El terreno es responsable de buen número de fallos de obras marítimas y portuarias. El proyecto geotécnico debe evitar, con determinadas garantías, la rotura del terreno y, en general, cualquier comportamiento anómalo de la obra causada por éste.

El concepto general de “seguridad” debe dividirse en las tres partes siguientes:

- a. **Fiabilidad.** Debe entenderse como la seguridad frente a fallos graves, que en la ROM 0.0 y en esta ROM 0.5 se denominan “estados límite últimos”. Se define como el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales adscritos a los Estados Límite Últimos.
- b. **Funcionalidad.** Debe entenderse como la seguridad existente frente a fallos que producen la pérdida de la funcionalidad de la obra de forma reversible o irreversible debido a un fallo estructural, estético, ambiental o por condicionante legal, que dentro del Programa ROM se denominan “estados límite de servicio”. Se define como el valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo frente a todos los modos principales adscritos a los Estados Límite de Servicio.
- c. **Operatividad.** Corresponde este concepto a la seguridad frente a posibles paradas operativas o garantía de uso de la obra. Difiere del fallo funcional principalmente por el tipo de causa que genera la pérdida de garantías del uso. Los fallos funcionales se entiende que persisten hasta que el ingeniero decide corregirlos a través de la reparación o reconstrucción de la obra, mientras que los fallos operativos cesan al cesar el agente (generalmente climático) que los provoca. Se define como el valor complementario de la probabilidad de parada frente a todos los modos de parada principales adscritos a los Estados Límite de Parada Operativa.

El nivel o grado de seguridad que debe garantizarse en los proyectos de las distintas obras marítimas y portuarias se indica en el apartado 3.2, en función del “carácter” de la obra.

I.4 CONSIDERACIÓN DE LOS EUROCÓDIGOS ESTRUCTURALES

La Comisión de la Comunidad Europea ha realizado el esfuerzo de establecer una serie de reglas técnicas denominadas Eurocódigos cuya intención es que sean de aplicación sistemática en los proyectos y construcción de obras de edificación y de ingeniería civil en los países de la Comunidad. Entre otros aspectos, intenta regular el “proyecto geotécnico”.

En relación con esta ROM 0.5, tienen especial importancia el Eurocódigo EC0: Bases del Proyecto Estructural y el Eurocódigo EC7: Proyecto Geotécnico. Parte I. Reglas Generales. Ambos códigos se han considerado el redactar esta versión de la ROM 0.5.

El Eurocódigo EC0 indica que la comprobación de la fiabilidad relacionada con la seguridad, la utilización y la durabilidad de las estructuras debe realizarse según los procedimientos que se indican en cada uno de los eurocódigos específicos. En el Programa ROM, de forma semejante, la ROM 0.0 indica que la fiabilidad, la funcionalidad y la operatividad, que encierran conceptos similares a los definidos en los Eurocódigos, deben realizarse de acuerdo con los distintos documentos específicos del Programa ROM.

Concretamente, el EC0 y los Eurocódigos que le siguen (serie de nueve códigos EC1 a EC9), indican que en caso de utilizarse cálculos de comprobación, estos se ordenen de acuerdo con los conceptos de Estados Límite y se resuelvan mediante métodos de cálculo basados en coeficientes parciales. Como alternativa se puede proyectar con apoyo directo en métodos probabilistas, en aquellos casos aún no bien resueltos en coeficientes parciales. Esto requiere la ayuda de expertos y se sale del alcance de los eurocódigos. En forma similar y compatible con el EC0, la ROM 0.0 indica que, siempre que se realicen cálculos, se utilice el concepto de Estados Límite

y se apliquen coeficientes parciales y además, en ciertos casos, completar el análisis con procedimientos de cálculo probabilistas.

En un Anejo del EC0 se indica que los coeficientes parciales que se dan en los Eurocódigos están deducidos con la intención de obtener unos valores mínimos de la fiabilidad necesaria.

A efectos de fijar la fiabilidad mínima exigible en estados límite últimos en los Eurocódigos, se establecen tres clases de proyectos (o estructuras, o componentes estructurales) en función de las consecuencias del fallo y se asigna, a cada una de ellas, un índice de fiabilidad β mínimo exigible. Ver Tabla 1.4.1.

Tabla 1.4.1. Eurocódigos. Valores mínimos recomendados del índice de fiabilidad β (Estados Límite Últimos)

	Clase de fiabilidad	Valor mínimo de β	
		Periodo de referencia 1 año	Periodo de referencia 50 años
Estados Límite Últimos	RC3	5,2	4,3
	RC2	4,7	3,8
	RC1	4,2	3,3

De forma también similar, la ROM 0.0 indica una fiabilidad objetivo para los Estados Límite Últimos que dependen del carácter de la obra.

Para los estados límite de servicio irreversibles, el EC0 indica unos índices de fiabilidad objetivo que son: $\beta = 2,9$ para el período de referencia de 1 año y $\beta = 2,3$ para el período de referencia de 50 años. De forma semejante, la ROM 0.0 indica varios índices de fiabilidad mínimos para los Estados Límite de Servicio.

Aunque los campos de aplicación de los Eurocódigos y de los documentos ROM son diferentes, existe un área común (obras portuarias) donde sería deseable que fuesen compatibles. La información actual apunta a que la aplicación del Eurocódigo EC0 en las áreas de competencia común con el Programa ROM será compatible con los documentos que se editen siguiendo las líneas generales indicadas en la ROM 0.0. Serán los distintos documentos de aplicación del Programa ROM los que finalmente permitan concluir si la aplicación de los Eurocódigos es aceptable por el Programa ROM y compatible con él en los casos específicos del conjunto de obras donde los ámbitos de aplicación se solapan.

Esta ROM 0.5 indica, como valores objetivo de los índices de fiabilidad, para los modos de fallo geotécnico asociada a Estados Límite Últimos, los valores $\beta_1 = 2,3$; $\beta_2 = 3,1$ y $\beta_3 = 3,7$ dependiendo del carácter de la obra y referidos a la vida útil de la obra. La vida útil de las obras marítimas y portuarias suele quedar en el rango comprendido entre 15 y 50 años. La fiabilidad objetivo en la ROM 0.5 sería similar a la de los Eurocódigos cuando la vida útil es 50 años y cuando se equiparan las obras de ISA bajo con las de Clase RC2 de los Eurocódigos y las obras de ISA alto o muy alto a las de Clase RC2 de los Eurocódigos. La Clase RC3 de los Eurocódigos no tendría una homóloga en la ROM 0.5. Las obras de ISA no significativos de esta ROM 0.5 tampoco tendrían una representación equivalente en los Eurocódigos. Para estos casos y para vidas útiles diferentes de 50 años, sería necesaria cierta adaptación de los valores de los coeficientes parciales. Y esto es posible pues tanto los Eurocódigos como la ROM 0.5 establecen un procedimiento sencillo para ajustar ligeramente los valores de los coeficientes parciales y de esa forma considerar el efecto de la fiabilidad objetivo que se pretende, cuando las diferencias no son muy grandes.

Los coeficientes de seguridad parciales (o sencillamente los coeficientes parciales) que se definen en el EC7 son sólo orientativos; los diversos países de la Comunidad pueden adaptarlos a sus condiciones específicas. Es más, cada país, dentro del EC7, puede elegir varias vías de verificación que difieren en las formas de introducir la seguridad ya sea en las acciones o en los efectos de las acciones, en los parámetros resistentes o en las resistencias. También en los modelos de cálculo. El EC7 indica varias vías posibles. Cada país podrá elegir una de ellas o permitir varias alternativas. Las vías que hoy se indican en el EC7 y los coeficientes de seguridad que hoy incluye a modo orientativo son acordes con la filosofía de esta ROM 0.5.

El Eurocódigo EC7 admite tres posibles vías de comprobación que, en esquema, pueden representarse de forma simbólica como sigue:

◆ Procedimiento de proyecto 1

Comprobación de dos posibles conjuntos combinados de coeficientes parciales:

- Conjunto combinado 1: A1 “+” M1 “+” R1
- Conjunto combinado 2: A2 “+” M2 “+” R1

Para pilotes y anclajes, las combinaciones de coeficientes parciales son:

- Conjunto combinado 1: A1 “+” M1 “+” R1
- Conjunto combinado 2: A2 “+” (M1 ó M2) “+” R4

◆ Procedimiento de proyecto 2

Comprobación con un solo conjunto de coeficientes parciales:

- Conjunto combinado: A1 “+” M1 “+” R2

◆ Procedimiento de proyecto 3

Comprobación con un solo conjunto de coeficientes parciales:

- Conjunto combinado: (A1 ó A2) “+” M2 “+” R3

En esta escritura simbólica se implican los siguientes significados:

- A1: Coeficientes parciales en las acciones, iguales a los del cálculo estructural.
- A2: Coeficientes parciales en las acciones, valores algo menores y específicos para el cálculo geotécnico.
- M1: Coeficientes parciales en parámetros resistentes iguales a la unidad.
- M2: Coeficientes parciales en los parámetros resistentes.
- R1, R2, R3 y R4: Coeficientes parciales en resistencias.
- “+”: Significa combinado con.
- (A1 ó A2): Significa que el conjunto de coeficientes en las acciones estructurales es el A1 y en las acciones geotécnicas es el A2.

Los coeficientes parciales en las acciones pueden aplicarse a los valores de las acciones o a los efectos de las acciones.

En el procedimiento de proyecto 1 se incluyen dos comprobaciones porque con ellas se quiere cubrir el proyecto puramente geotécnico y también el proyecto estructural de los elementos de cimentación.

Es evidente que el entendimiento de todos los detalles de estos tres procedimientos de proyecto requiere el estudio del EC7 en toda su extensión.

Esta ROM 0.5 ha elegido, como procedimiento de proyecto y para comprobaciones exclusivamente geotécnicas el conjunto de coeficientes parciales que podría representarse, de forma simbólica de la forma siguiente:

◆ Procedimiento ROM 0.5

Cálculos geotécnicos: Conjunto de coeficientes parciales A2 “+” M1 “+” F.

De esta forma los cálculos justificativos se hacen siempre con los parámetros del terreno que se creen más representativos y las acciones se mayoran poco. Con ello se enlaza, con cambios menores, con la práctica anterior descrita en la ROM 0.5-94, aunque ahora se calcule con cierta mayoración de acciones.

Esta forma de proceder aunque es similar a las que figuran en el EC7 no coincide con ninguna de ellas exactamente. Los valores de F que se indican en esta ROM 0.5-05 serían formalmente equiparables a los valores de R que se indican en el EC7, aunque en general son mayores pues se incluye en ellos mayor parte de la incertidumbre geotécnica.

En esta ROM 0.5, que no considera el proyecto estructural de los elementos de cimentación o de contención (muros), se indica que para el proyecto estructural, además, debe considerarse otro conjunto de coeficientes parciales cuya definición cae fuera de su alcance.

Mientras se redactan los Documentos Nacionales de Aplicación del EC7 y hasta que no sean de aplicación obligatoria, esta ROM 0.5 indica unas formas de cálculo provisionales que se consideran aceptables y compatibles con lo que hoy se puede intuir lo que va a ser el documento nacional de aplicación en España. En el futuro será necesario confirmar este extremo y es posible que sea obligatorio modificar algunos aspectos de esta ROM 0.5-05.

Cuando el EC7 sea de obligado cumplimiento se recomienda que los proyectos de las obras marítimas y portuarias que pudieran desarrollarse a su amparo se evalúen también con los criterios del Programa ROM. De esta forma se adquirirá experiencia para valorar las posibles diferencias.

1.5 DEFINICIONES

Únicamente se recogen en este apartado las definiciones de los términos más habituales en el tratamiento específico de problemas de tipo geotécnico. Para cualquier otro término no incluido en la siguiente relación, se remite a las restantes Recomendaciones del Programa ROM.

- ◆ ACCIÓN O CARGA: Toda causa o agente actuante capaz de generar cambios tensionales o deformaciones tanto en las estructuras como en el terreno.
- ◆ ALTURA DE OLA: Distancia vertical entre una cresta y el seno precedente.
- ◆ ANCLAJE: Elemento que, trabajando a tracción, permite aplicar una carga puntual en una estructura de contención.
- ◆ ANCLAJE ACTIVO: Anclaje al que se aplica una tensión previa al finalizar su instalación.
- ◆ ANCLAJE PASIVO: Anclaje que es colocado sin aplicarle tensión (o aplicando una tensión mínima) durante la instalación, tomando posteriormente carga a lo largo de las sucesivas Fases de la obra.
- ◆ APUNTALAMIENTO: Elemento que, trabajando a compresión, permite aplicar una carga sobre una estructura de contención. También puede denominarse codal.
- ◆ ARCILLA: Fracción de suelo cuyas partículas tienen un tamaño aparente menor de 0,002 mm (aprox.), en ensayos granulométricos por sedimentación.
- ◆ ARENA: Fracción de suelo cuyas partículas tienen un tamaño comprendido entre 0,08 mm y 2 mm (aprox.). Fina hasta 0,2 mm; media hasta 0,6 mm; gruesa por encima de 0,6 mm.
- ◆ CALICATA: Excavación de pequeña profundidad realizada manualmente o con máquina para investigar el terreno.

- ◆ **CARGA ACCIDENTAL:** Carga de carácter fortuito o anormal que puede presentarse como resultado de un accidente, mal uso, error humano, funcionamiento deficiente de algún elemento, condiciones medioambientales o de trabajo excepcionales, etc.
- ◆ **CARGA DINÁMICA:** Carga cuya actuación genera aceleraciones significativas en el terreno o en las estructuras.
- ◆ **CARGA ESTÁTICA:** Carga cuya actuación no genera aceleraciones significativas ni en el terreno ni en las estructuras.
- ◆ **CARGA PERMANENTE:** Carga que actúa de modo continuo durante la Fase de proyecto que se analiza.
- ◆ **CARGA VARIABLE:** Carga cuya magnitud o posición pueden sufrir alteraciones durante la Fase de proyecto que se analiza.
- ◆ **CODAL:** Véase “apuntalamiento”.
- ◆ **COEFICIENTE DE MAYORACIÓN DE CARGAS:** Factor multiplicativo de los valores representativos de las acciones para obtener los valores a utilizar en el cálculo.
- ◆ **COEFICIENTE DE MINORACIÓN DE RESISTENCIAS DEL TERRENO:** Coeficiente por el que se divide el valor estimado de la resistencia del terreno para obtener el valor de diseño a utilizar en los cálculos.
- ◆ **COEFICIENTE DE SEGURIDAD:** Cociente de dos magnitudes homólogas. Una representativa de la resistencia del terreno (numerador) y otra representativa del efecto de las acciones (denominador).
- ◆ **COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD:** Relación D_{60}/D_{10} de una muestra de suelo.
- ◆ **COLAPSO:** Disminución de volumen que experimentan algunos suelos al aumentar su humedad sin variar la presión aplicada.
- ◆ **CONSOLIDACIÓN:** Período transitorio en el que un suelo saturado expulsa agua hasta alcanzar una situación estable.
- ◆ **CONTRAEMPUJE:** Empuje que es necesario movilizar en el extremo inferior de una pantalla para obtener un equilibrio de las fuerzas actuantes sobre la misma.
- ◆ **COMPACTACIÓN DINÁMICA:** Tratamiento del terreno consistente en la aplicación de energía en la superficie del mismo mediante el impacto producido por la caída de una gran masa desde una altura elevada.
- ◆ **DENSIDAD APARENTE:** Masa real de una muestra (partículas sólidas + agua) dividida entre el volumen total de la misma.
- ◆ **DENSIDAD SATURADA:** Densidad correspondiente a una muestra saturada, con todos sus poros llenos de agua.
- ◆ **DENSIDAD SECA:** Masa de las partículas sólidas dividida por el volumen total de la muestra.
- ◆ **DENSIDAD SUMERGIDA:** Densidad virtual que el material saturado tendría al estar sumergido en agua.
- ◆ **DIACLASA:** Superficie de discontinuidad de un macizo rocoso originada por las tensiones experimentadas a lo largo de su historia geológica.
- ◆ **DUQUE DE ALBA:** Estructura exenta diseñada para soportar esfuerzos horizontales de amarre o atraque, o servir de protección a otras estructuras (para evitar el impacto directo de embarcaciones contra ellas).

- ◆ EFECTO SILO: Fenómeno físico que reduce las compresiones verticales en un material ensilado como consecuencia del rozamiento con las paredes del silo.
- ◆ EMPOTRAMIENTO: Zona de la estructura que queda por debajo de la superficie del terreno.
- ◆ EMPUJE ACTIVO: Empuje sobre una estructura de contención cuando ésta experimenta un desplazamiento suficientemente amplio alejándose de la carga.
- ◆ EMPUJE AL REPOSO: Empuje que corresponde a la situación ideal de desplazamiento nulo de una estructura de contención.
- ◆ EMPUJE PASIVO: Empuje sobre una estructura de contención cuando ésta experimenta un desplazamiento suficientemente amplio contra el terreno.
- ◆ ENSAYO PENETROMÉTRICO: Ensayo consistente en hincar en el terreno un varillaje, con dimensiones y puntaza tipificadas, midiéndose la resistencia opuesta a la hinca. La hinca puede efectuarse mediante golpeo (ensayo de penetración dinámico) o por aplicación de una presión (ensayo de penetración estático).
- ◆ ENTIBACIÓN: Estructura de contención de una excavación que va siendo colocada simultáneamente con la propia ejecución de la excavación.
- ◆ ESTADOS LÍMITE: Estados de proyecto en los cuales, la obra en su conjunto, o en alguno de sus tramos o elementos, queda fuera de uso o servicio por incumplimiento de los requisitos de seguridad, de servicio y de explotación especificados en el proyecto.
- ◆ ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO: Situaciones que suponen que una obra, estructura o elemento, deja de cumplir los requisitos de calidad (por razones funcionales, estéticas, de durabilidad, etc) establecidos en el proyecto, aunque ello no implique la ruina o puesta fuera de servicio de modo inmediato.
- ◆ ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS: Situaciones que suponen la puesta fuera de servicio de una determinada obra, estructura o elemento, como consecuencia de rotura, hundimiento, pérdida de estabilidad o cualquier otra forma de fallo.
- ◆ FANGO: Suelo constituido por partículas finas, depositado en medio acuático, con densidad y consistencia bajas.
- ◆ FINOS: Partículas de tamaño inferior al tamiz 200 ASTM (0,076 mm) o 0,080 UNE (0,08 mm). En escolleras, suele aplicarse a los fragmentos inferiores a 1'' ó 25 mm.
- ◆ GRADIENTE HIDRÁULICO: Cociente de la diferencia del nivel piezométrico entre dos puntos dividida por la distancia.
- ◆ GRADO DE CONSOLIDACIÓN: Porcentaje disipado de las sobrepresiones intersticiales generadas como consecuencia de la aplicación de una carga sobre un suelo con abundante proporción de finos y saturado.
- ◆ GRADO DE SATURACIÓN: Porcentaje de poros que están ocupados por el agua.
- ◆ GRAVA: Fracción de suelo cuyas partículas tienen un tamaño comprendido entre 2 mm y 60 mm (aprox.). Fina hasta 6 mm; media hasta 20 mm; gruesa por encima de 20 mm.
- ◆ HINCHAMIENTO: Incremento de volumen que experimentan algunos suelos al aumentar su humedad.
- ◆ HINCHAMIENTO LIBRE: Cambio porcentual de volumen que experimenta un suelo al saturarlo con presiones efectivas bajas.

- ◆ **HUMEDAD:** Cociente entre el peso de agua contenido en una determinada muestra y el peso del terreno seco.
- ◆ **HUMEDAD DE SATURACIÓN:** Humedad de una muestra en la cual todos los poros están llenos de agua.
- ◆ **ÍNDICE DE POROS:** Relación entre el volumen ocupado por los poros y el volumen ocupado por las partículas sólidas.
- ◆ **INTRADÓS:** Superficie exterior de una estructura de contención.
- ◆ **INYECCIÓN POR IMPREGNACIÓN:** Tratamiento consistente en forzar la entrada de lechadas de cemento y agua (con o sin aditivos), o de otros productos, a través de los poros del suelo. La similitud de la técnica de ejecución hace que se pueda aplicar esta designación cuando el objetivo es rellenar fracturas o pequeños huecos en la roca.
- ◆ **INYECCIONES DE ALTA PRESIÓN (JET GROUTING):** Tratamiento del terreno en el cual se produce una mezcla del terreno (disgregado como consecuencia de la aplicación de fluidos a velocidades muy altas -jets-, a través de toberas de pequeño diámetro) con el cemento de la lechada de inyección.
- ◆ **INYECCIONES DE COMPACTACIÓN:** Tratamiento consistente en inyectar un mortero espeso, de cemento y arena, en el fondo de un taladro, produciendo con ello un desplazamiento del terreno.
- ◆ **INYECCIONES DE FRACTURACIÓN:** Tratamiento consistente en la introducción en el terreno de una lechada de cemento a elevada presión, dando lugar a la formación de lajas de inyección como consecuencia de haberse producido la hidrofracturación del suelo.
- ◆ **LICUEFACCIÓN:** Anulación de la capacidad para resistir esfuerzos de corte en un suelo granular fino con densidad relativa baja y saturado, como consecuencia del aumento de la presión intersticial originado por las vibraciones.
- ◆ **LIMO:** Fracción de suelo cuyas partículas tienen un tamaño comprendido entre 0,002 mm y 0,08 mm (aprox.).
- ◆ **MICROPILOTE:** Pilote perforado in situ de pequeño diámetro (normalmente inferior a 300 mm), ejecutado mediante perforación, provisto en general de armaduras (redondos o tubular) y relleno con mortero inyectado aplicando una presión en la embocadura.
- ◆ **MÓDULO DE BALASTO:** Resultado de dividir la compresión aplicada sobre una superficie de terreno entre el desplazamiento producido en la dirección de dicha compresión. Designado asimismo como módulo de reacción o módulo de Winkler.
- ◆ **NIVEL PIEZOMÉTRICO:** Nivel que alcanza el agua en un tubo piezométrico al colocarlo en un punto.
- ◆ **NÚMERO DE ESTABILIDAD:** Parámetro adimensional (peso específico del suelo multiplicado por altura y dividido por cohesión) utilizado en el análisis de estabilidad, empuje sobre entibaciones, etc.
- ◆ **PENETRÓMETRO:** Equipo para realizar ensayos penetrométricos; en ocasiones, se utiliza este término para designar el ensayo propiamente dicho.
- ◆ **PESO ESPECÍFICO APARENTE:** Peso real de una muestra (partículas sólidas + agua) dividido entre volumen total de la misma.
- ◆ **PESO ESPECÍFICO SATURADO:** Peso específico correspondiente a una muestra saturada, con todos sus poros llenos de agua.
- ◆ **PESO ESPECÍFICO SECO:** Peso de las partículas sólidas, dividido por el volumen total de la muestra.

- ◆ PESO ESPECÍFICO SUMERGIDO: Peso específico virtual que el material saturado tendría al estar sumergido en agua.
- ◆ PIEZOCONO: Equipo consistente en un penetrómetro estático que lleva incorporado un piezómetro en la punta.
- ◆ PILOTE: Elemento estructural esbelto utilizado como cimentación profunda.
- ◆ POROSIDAD: Relación entre el volumen ocupado por los poros y el volumen total de la muestra (partículas sólidas + poros).
- ◆ PRECARGA: Tratamiento del terreno consistente en la aplicación al terreno de una carga temporal (de tierras, generalmente) previa a la actuación de las cargas definitivas, con objeto de acelerar la consolidación y mejorar la resistencia y la deformabilidad.
- ◆ PRESIÓN EFECTIVA: Presión intergranular transmitida a través de los contactos entre las partículas de los suelos.
- ◆ PRESIÓN DE HINCHAMIENTO: Presión que evita la expansión de un suelo durante su saturación.
- ◆ PRESIÓN DE PRECONSOLIDACIÓN: Máxima presión efectiva que ha soportado un suelo en el pasado.
- ◆ PUNTAL: Véase “apuntalamiento”.
- ◆ RAZÓN DE SOBRECONSOLIDACIÓN: Cociente entre la presión de preconsolidación y la presión efectiva actual.
- ◆ RELLENO: Depósito artificial realizado con materiales naturales, piezas artificiales o productos de desecho.
- ◆ RELLENO DE ESCOMBROS (ANTRÓPICO): Relleno efectuado con productos de desecho humano (escombros, ladrillos, etc), de carácter heterogéneo.
- ◆ RELLENO ESTRUCTURAL: Relleno situado próximo a una estructura y cuyas características desempeñan un papel importante en la estabilidad o deformación del conjunto.
- ◆ RELLENO GENERAL: Relleno situado en zonas alejadas de las estructuras y/o sin misión estructural.
- ◆ RELLENO GRANULAR: Relleno efectuado con materiales con un bajo contenido de finos (limos y arcillas).
- ◆ RELLENO HIDRÁULICO: Relleno depositado mediante un proceso de sedimentación de partículas sólidas contenidas en un efluente (procedente, en general, de un dragado).
- ◆ REPTACIÓN: Deslizamiento de un suelo sobre un sustrato rocoso a lo largo de una superficie sensiblemente paralela al talud.
- ◆ RESISTENCIA DE PICO: Máxima resistencia al corte de un determinado suelo.
- ◆ RESISTENCIA RESIDUAL: Resistencia al corte de un determinado suelo para grandes deformaciones; mucho mayores que la correspondiente a la resistencia de pico.
- ◆ RETRACCIÓN: Disminución de volumen que experimentan algunos suelos al disminuir su humedad.
- ◆ ROCA: Agregado natural de uno o más minerales que no sufre modificaciones sensibles en presencia de agua.

- ◆ **ROZAMIENTO NEGATIVO:** Incremento de carga en un pilote producido como consecuencia del asentamiento del terreno que lo rodea.
- ◆ **SIFONAMIENTO:** Arrastre de partículas que produce erosión interna en el terreno natural o en relleños artificiales a causa del flujo del agua. En ocasiones se llama «sifonamiento» al levantamiento del fondo de excavaciones ocasionados por un fuerte gradiente de presiones intersticiales que llega a anular la tensión efectiva.
- ◆ **SITUACIÓN DE PROYECTO:** Esquema simplificado de un problema real, que incluye, para el plazo de tiempo asociado, una definición de la geometría, las características de los materiales y las acciones, todo lo cual sirve de base para la realización de los cálculos correspondientes.
- ◆ **SOCAVACIÓN:** Erosión superficial del terreno causada por el movimiento del agua.
- ◆ **SONDEO:** Perforación profunda de pequeño diámetro, con extracción de testigo.
- ◆ **SUBPRESIÓN:** Fuerza ascendente producida por el agua sobre una estructura, elemento de contención o de cimentación sumergido.
- ◆ **SUBSIDENCIA:** Asiento generalizado de la superficie del terreno debido a un cambio tensional importante en su interior. Es típica la causada por rebajamiento del nivel freático en suelos blandos.
- ◆ **SUELO:** Parte de la corteza terrestre formada por materiales fragmentados o sueltos, pudiendo ser fácilmente separado en partículas individuales.
- ◆ **SUELO METAESTABLE:** Suelo susceptible de experimentar cambios volumétricos importantes al variar su humedad.
- ◆ **SUELO NORMALMENTE CONSOLIDADO:** Suelo cuya presión efectiva actual es igual a su presión de preconsolidación.
- ◆ **SUELO PRECONSOLIDADO:** Suelo cuya presión efectiva actual es inferior a su presión de preconsolidación.
- ◆ **SUSCEPTIBILIDAD TIXOTRÓPICA (TIXOTROPÍA):** Relación entre la resistencia al corte de un material arcilloso en estado natural y la correspondiente al mismo material después de remodelado con la misma densidad y humedad.
- ◆ **TAMAÑO MÁXIMO:** Abertura del tamiz más pequeño que deja pasar la totalidad de una determinada muestra de suelo.
- ◆ **TRASDÓS:** Superficie interior (en contacto con el terreno retenido) de una estructura de contención.
- ◆ **TRASDÓS VIRTUAL:** Trasdós equivalente sobre el que se consideran actuando los empujes al analizar determinados problemas relativos a estructuras de contención.
- ◆ **TOPE ESTRUCTURAL:** Capacidad resistente de un elemento de cimentación o contención.
- ◆ **VIBROCOMPACTACIÓN:** Tratamiento de un terreno granular consistente en la densificación mediante la introducción en el mismo de un torpedo vibratorio.
- ◆ **VIBROFLOTACIÓN:** Tratamiento de vibrocompactación sin aportación de material.
- ◆ **VIBROSUSTITUCIÓN:** Tratamiento de vibrocompactación con aportación de material granular grueso.

I.6 SISTEMA DE UNIDADES

El sistema de unidades usado en estas Recomendaciones corresponde al Sistema Legal de Unidades de Medida obligatorio en España, denominado Sistema Internacional de Unidades (SI).

Las unidades básicas del Sistema Internacional más comúnmente utilizadas en el campo de la geotecnia son las siguientes:

- ◆ Longitud : Metro (m).
- ◆ Masa : Kilogramo (kg) o su múltiplo la tonelada (1 t = 1000 kg).
- ◆ Tiempo : Segundo (s).
- ◆ Fuerza : Newton (N) o su múltiplo el kilonewton (1 kN = 1000 N).

Para la tensión o presión (fuerza por unidad de superficie) se empleará el Pascal (Pa = N/m²). Se emplearán como múltiplos el kilopascal (kPa = kN/m²) y el megapascal (1 MPa = 1 MN/m² = 10³ kN/m² = 10⁶ N/m²). También se empleará otro múltiplo, el «bar», que equivale a 10⁵ Pa = 100 kPa.

Comentario: La correspondencia entre las unidades del Sistema Internacional S.I. y las del sistema Metro-Kilopondio-Segundo es la siguiente:

Newton – kilopondio: 1 N = 0,102 kp e inversamente 1 kp = 9,81 N

Newton por milímetro cuadrado – kilopondio por centímetro cuadrado: 1 N/mm² = 10,2 kp/cm² e inversamente 1 kp/cm² = 0,0981 N/mm²

Las unidades preferentes para definir los parámetros geotécnicos principales se indican en la Tabla 2.14.1.

I.7 NOTACIONES

En la Tabla 1.7.1 se incluyen las notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales referidos a aspectos geotécnicos y empleados de modo específico en esta Recomendación ROM 0.5.

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones

Símbolo	Definición	Unidades
I. MAYÚSCULAS LATINAS		
A	Área	m ²
A,B	Coefficientes de presión intersticial	*
A _f	Área del fuste de un pilote	m ²
A _p	Área de la punta de un pilote	m ²
B	Anchura o dimensión menor en planta de una cimentación	m
B	Anchura de un recinto excavado	m
B*, L*	Dimensiones equivalentes de una cimentación directa	m
C	Perímetro de la sección transversal en un pilote	m
C _c	Índice de compresión	*
C _s	Índice de entumecimiento	*
C _u	Coefficiente de uniformidad	*

(Continúa)

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
I. MAYÚSCULAS LATINAS		
D	Profundidad (de una cimentación superficial, espesor de un estrato, etc), anchura, diámetro, etc.	m
D	Amortiguamiento relativo	%
D _{máx}	Tamaño máximo de las partículas de una muestra	mm
D _r	Densidad relativa	%
D _x	Tamaño del tamiz que deja pasar el x por ciento de una determinada muestra de suelo	mm
E	Módulo de elasticidad	MN/m ²
E	Empuje sobre una estructura de contención	kN ó kN/m
E _a	Empuje activo	kN ó kN/m
E _{ap}	Módulo de elasticidad aparente (tensiones totales)	MN/m ²
E _h , E _v	Componentes del empuje de tierras sobre un muro	kN ó kN/m
E _m	Módulo edométrico	MN/m ²
E _o	Empuje al reposo	kN ó kN/m
E _p	Empuje pasivo	kN ó kN/m
E _w	Empuje producido por el agua	kN ó kN/m
F	Designación general de los coeficientes de seguridad	*
F _A	Fuerza horizontal, debida al empuje activo, sobre los pilotes de una determinada alineación (A) situada en las proximidades del trasdós de un muro	kN
F _d	Coefficiente de seguridad frente al deslizamiento a lo largo de una superficie plana	*
F _h	Coefficiente de seguridad frente al hundimiento	*
F _v	Coefficiente de seguridad al vuelco	*
G	Peso específico relativo de las partículas sólidas	*
G	Módulo de rigidez transversal	MN/m ²
G _o	Módulo de rigidez transversal para pequeñas deformaciones	MN/m ²
H	Carga horizontal	MN
H	Altura de un muro	m
H	Longitud de drenaje en problemas de consolidación	m
H	Altura, en general	m
H	Profundidad, en general	m
H _{rot}	Carga horizontal sobre un pilote que produce la rotura del terreno	kN
H _d	Altura de la ola de cálculo	m
I	Gradiente hidráulico	*
IC	Índice de consistencia	*
IF	Índice de fluidez	*
IP	Índice de plasticidad	*
I _v	Gradiente vertical del flujo de agua	*
J	Coefficiente de resistencia viscosa utilizado en el estudio dinámico de la hincada de pilotes	*
K	Módulo de balasto	kN/m ³
K	Factor de cuña	*
K _a	Coefficiente de empuje activo	*
K _{ac}	Coefficiente de empuje activo para calcular el efecto de la cohesión	*
K _{ah}	Coefficiente de empuje activo horizontal	*
K _{av}	Coefficiente de empuje activo vertical	*

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
I. MAYÚSCULAS LATINAS		
K_o	Coeficiente de empuje al reposo	*
K_p	Coeficiente de empuje pasivo	*
K_{ph}	Coeficiente de empuje pasivo horizontal	*
K_{pv}	Coeficiente de empuje pasivo vertical	*
K_R	Constante de muelle en el estudio de pantallas	kN/m ²
K_v, K_h	Constantes de resorte para el estudio de desplazamientos de cimentaciones	kN/m
K_θ	Constante de resorte para el estudio de giros de cimentaciones	kN·m
L	Longitud de un pilote	m
L	Espesor de una capa compresible	m
LL	Límite líquido	*
LP	Límite plástico	*
M	Momento flector	kN·m
M	Carga total actuante, por metro lineal, en una cimentación alargada menos el peso de las tierras excavadas para su construcción	kN/m
M	Masa de la maza en los tratamientos de consolidación dinámica y en los estudios de hinca de pilotes	kg
N	Índice del ensayo SPT: número de golpes para la hinca de los 30 cm centrales	*
N	Carga total actuante sobre una cimentación menos el peso de las tierras excavadas para su construcción (carga neta)	kN
N'	Compresión efectiva normal sobre un plano	kN
N_B	Índice del ensayo Borro: número de golpes para avanzar la hinca 20 cm	*
N_c, N_q, N_γ	Coeficientes de capacidad de carga para estimar la carga de hundimiento de una cimentación superficial	*
N_f	Número total de tubos de flujo de una red de filtración	*
N_k	Factor adimensional para la interpretación de los resultados de los ensayos de penetración estática	*
N_o	Número de estabilidad (peso específico por altura y dividido por cohesión)	*
N_p	Número total de saltos de potencial en una red de filtración	*
P	Perímetro	m
Q	Caudal	m ³ /s
Q	Carga vertical que actúa sobre un pilote	kN
Q	Esfuerzo cortante	kN
Q_f	Carga máxima que puede transmitir un pilote a lo largo de su fuste	kN
Q_h	Carga de hundimiento de un pilote	kN
Q_L	Sobrecarga lineal	kN/m
Q_p	Carga máxima que puede soportar la punta de un pilote	kN
Q_p	Sobrecarga puntual	kN
R	Radio de influencia de un pozo	m
R	Radio de una cimentación circular	m
R_h	Resultante de fuerzas horizontales	kN
R_p	Resistencia por la punta de un pilote	kN
S	Esfuerzo cortante	kN
S, S_w	Subpresión	kN
T	Resistencia a la extracción de un pilote	kN

(Continúa)

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
I. MAYÚSCULAS LATINAS		
T	Longitud elástica de un pilote	m
T	Fuerza horizontal, de carácter externo, actuante sobre una estructura de contención	kN
T	Fuerza a que está sometido un elemento de anclaje	kN
T	Esfuerzo total de corte actuando sobre una superficie	kN
T	Esfuerzo a tracción en un elemento	kN
T _a , T _p	Componentes tangenciales del empuje sobre una estructura de contención (zona de empuje activo o pasivo, respectivamente)	kN ó kN/m
T _h , T _v	Período fundamental de vibración en modo horizontal, vertical	s
T _v	Factor de tiempo	*
T _θ	Período fundamental de vibración en modo de giro	s
U	Grado de consolidación	*
UL	Unidad Lugeon	*
V	Carga vertical sobre una cimentación	kN
V	Resultante de fuerzas verticales	kN
W	Peso	kN
X, Y	Coordenadas en planta	m
X _d	Valor de diseño de un factor de proyecto	*
X _k	Valor característico de un factor de proyecto	*
X _m	Valor medio o mejor estimación de un factor de proyecto	*
Z	Cota de un punto	m
Z	Impedancia de un pilote utilizada en el estudio dinámico de la hinca	kN·s/m
II. MINÚSCULAS LATINAS		
a	Adhesión terreno-estructura	N/m ²
a	Aceleración sísmica	m/s ²
a _h	Aceleración sísmica horizontal	m/s ²
a _v	Aceleración sísmica vertical	m/s ²
c	Cohesión	N/m ²
c	Velocidad (o celeridad) de las ondas de compresión, de un pilote	m/s
c _{ap}	Cohesión en condiciones no saturadas	N/m ²
c _u	Cohesión en condiciones sin drenaje	N/m ²
c _v	Coefficiente de consolidación	m ² /s
d	Distancia	m
d _x	Tamaño del tamiz que deja pasar el x por ciento en una determinada muestra de suelo	mm
e	Índice de poros	*
e	Excentricidad de la carga aplicada sobre una cimentación	m
e	Empuje unitario	kN/m ²
e _a	Empuje activo (unitario)	kN/m ²
e _p	Empuje pasivo (unitario)	kN/m ²
e _o	Empuje al reposo (unitario)	kN/m ²
e _o	Índice de poros inicial del terreno	*
f _g	Factor de corrección, en general	*
g	Aceleración de la gravedad	m/s ²

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
II. MINÚSCULAS LATINAS		
h	Diferencia de nivel del agua entre ambos lados de un elemento impermeable	m
h	Espesor de un estrato, altura de un elemento, etc	m
i_c, i_q, i_γ	Coefficientes de inclinación de la estimación de la carga de hundimiento de una cimentación superficial	*
k	Coefficiente de permeabilidad	m/s
k_h	Coefficiente de permeabilidad horizontal	m/s
k_v	Coefficiente de permeabilidad vertical	m/s
m, n	Factores geométricos en estudios elásticos de distribución de tensiones o de asientos	*
n	Porosidad	*
n	Coefficiente de forma empleado en el estudio de problemas de permeabilidad	m ó *
n_h	Constante de proporcionalidad que expresa el crecimiento del módulo de balasto con la profundidad	kN/m ³
p	Presión transmitida por una cimentación superficial	N/m ²
p_a	Incremento del empuje activo unitario producido por la existencia de una sobrecarga	kN/m ²
p_{ah}	Incremento del empuje activo unitario horizontal producido por la existencia de una sobrecarga	kN/m ²
$p_{v, comp}$	Presión vertical de comparación	kN/m ²
$p_{v, adm}$	Tensión admisible del terreno	kN/m ²
q	Presión efectiva a nivel de la profundidad de apoyo de una cimentación superficial	N/m ²
q	Sobrecarga superficial	N/m ²
q_c	Resistencia a la penetración estática	N/m ²
q_p	Resistencia unitaria por la punta de un pilote	N/m ²
q_u	Resistencia a compresión simple	N/m ²
s	Asiento	m
s	Separación entre centros de pilotes de un grupo de pilotes	m
s	Avance por golpe al final de la hincada de un pilote	mm
s_c, s_q, s_γ	Coefficientes de forma en la estimación de la carga de hundimiento de una cimentación superficial	*
s_f	Asiento al final de una prueba de carga	m
s_t	Susceptibilidad tixotrópica	*
s_u	Resistencia al corte sin drenaje en suelos arcillosos saturados	N/m ²
s_∞	Asiento teórico que corresponde a un tiempo infinito	m
t	Profundidad o empotramiento de tablestacas y pantallas, por debajo del fondo de excavación	m
t	Tiempo para alcanzar un determinado grado de consolidación	s
t_{\min}	Empotramiento mínimo de una pantalla deducido tras la consideración de los Estados Límite Últimos controlados por la resistencia del terreno	m
u	Presión intersticial	N/m ²
v	Velocidad	m/s
v_p	Velocidad de las ondas de compresión	m/s
v_s	Velocidad de las ondas de corte	m/s
w	Humedad	%
w_{sat}	Humedad de saturación	%
z	Profundidad bajo un nivel de referencia (superficie del terreno, nivel de cimentación, etc)	m
z_{\min}	Valor mínimo de la profundidad	m

(Continúa)

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
III. GRIEGAS		
α	Parámetro adimensional empleado en diversas fórmulas	*
α	Ángulo que forma el trasdós virtual de un muro con la vertical	grados ó rd
α	Ángulo que forma con la horizontal la parte inferior de una rebanada en un cálculo de estabilidad	grados ó rd
α	Semiángulo del diedro de una cuña de roca	grados ó rd
β	Parámetro adimensional utilizado en diversas fórmulas (longitud de sondeos, etc)	*
β	Factor de corrección de la presión vertical admisible en una cimentación directa sobre un suelo granular cuando existe un flujo ascendente	*
β	Ángulo que forma la superficie del terreno situado en el trasdós del muro con la horizontal	grados ó rd
β	Pendiente de la arista de una cuña de roca	grados ó rd
β	Índice de fiabilidad	*
γ	Peso específico	kN/m ³
γ	Deformación angular	%
γ'	Peso específico sumergido	kN/m ³
γ_A	Coefficiente de mayoración de acciones accidentales	*
γ_{ap}	Peso específico aparente	kN/m ³
γ_d	Peso específico seco	kN/m ³
γ_G	Coefficiente de mayoración de acciones permanentes	*
γ_Q	Coefficiente de mayoración de acciones variables	*
γ_s	Peso específico de partículas sólidas	kN/m ³
γ_{sat}	Peso específico saturado	kN/m ³
γ_w	Peso específico del agua	kN/m ³
Δ	Descenso del nivel piezométrico en un punto exterior a un pozo de bombeo	m
Δ	Incremento de longitud de una pantalla para movilizar el contraempuje	m
Δ_m	Máximo rebajamiento del nivel piezométrico producido mediante un pozo de bombeo	m
δ	Inclinación de la resultante aplicada sobre una cimentación	grados ó rd
δ	Desplazamiento horizontal	m
δ	Inclinación del empuje (activo o pasivo) respecto a la normal al paramento del trasdós, real o virtual, de un muro ("ángulo de rozamiento tierras-muro")	grados ó rd
ϵ	Ángulo formado por el plano bisector de una cuña de roca y el plano vertical que pasa por la arista	grados ó rd
ζ	Inclinación de la línea de rotura del terreno en el estudio de empujes sobre muros. También otros significados	grados ó rd
θ	Inclinación del empuje total (empuje de tierras + empuje de agua) respecto a la normal al paramento del trasdós de un muro	grados ó rd
λ	Factor de corrección de la presión vertical admisible en una cimentación directa sobre un suelo granular por la profundidad de un nivel freático permanente. También otros significados	*
μ	Coefficiente para caracterizar la distribución de drenes artificiales	*
ν	Módulo de Poisson	*
ν_{ap}	Módulo de Poisson aparente (tensiones totales)	*
ξ	Coefficiente de dispersión para obtener el valor característico de un parámetro a partir del valor medio	*
ρ	Densidad	kg/m ³
ρ	Radio polar de una espiral logarítmica (en análisis de problemas de rotura del suelo)	m

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Símbolo	Definición	Unidades
III. GRIEGAS		
σ	Tensión normal sobre un plano	kN/m ²
σ'	Tensión efectiva normal sobre un plano	kN/m ²
σ_v	Tensión normal vertical (actuante sobre un plano horizontal)	kN/m ²
σ'_v	Tensión efectiva vertical	kN/m ²
$\sigma_{vo}, \sigma'_{vo}$	Tensión vertical (total o efectiva) antes de realizar la obra	kN/m ²
σ'_{vp}	Presión vertical efectiva a nivel de la punta de un pilote	kN/m ²
τ	Tensión de corte sobre un plano	kN/m ²
τ_f	Resistencia unitaria por el fuste en un pilote	kN/m ²
ϕ	Diámetro	m
ϕ	Ángulo de rozamiento interno	grados ó rd
ϕ	Potencial o carga hidráulica	m
ϕ_{ap}	Ángulo de rozamiento interno en condiciones no saturadas	grados ó rd
ϕ_c	Ángulo de rozamiento en el contacto terreno-estructura	grados ó rd
ϕ_d	Diámetro equivalente de un dren	m
$\phi_{equivalente}$	Ángulo de rozamiento interno ficticio para el cálculo en terrenos heterogéneos	grados ó rd
ϕ_u	Ángulo de rozamiento interno en condiciones sin drenaje	grados ó rd
ϕ_1, ϕ_2	Funciones de Steinbrenner para el cálculo de asientos	*
Ψ, Ω	Ángulos auxiliares utilizados en las fórmulas de cálculo de empujes	grados ó rd

Nota: * indica un valor adimensional

Abreviatura	Significado
IV. ABREVIATURAS	
AIPCN (PIANC)	International Navigation Association
AGS	Estado Límite de Servicio debido a deformaciones excesivas del terreno
ASCE	American Society of Civil Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BSI	British Standards Institute
CBR	California Bearing Ratio
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
CIRIA	Construction Industry Research and Information Association (U.K.)
CPT	Cone Penetration Test
CPTU	Cone Penetration Test with Pore Pressure
DEX	Estado Límite de Servicio debido a alteraciones geométricas significativas
DIN	Deutsches Institut für Normung
DPH	Dynamic Probing Heavy
DPSH	Dynamic Probing Super-heavy
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural
ELS	Estado Límite de Servicio
ELU	Estado Límite Último
EQU	Estado Límite Último debido a la pérdida de equilibrio estático
EST	Estado Límite de Servicio debido a razones estéticas
FIL	Estado Límite de Servicio debido a filtraciones excesivas

(Continúa)

Tabla 1.7.1. Notaciones, abreviaturas y símbolos convencionales fundamentales utilizados en estas Recomendaciones (Continuación)

Abreviatura	Significado
IV. ABREVIATURAS	
GEO	Estado Límite Último debido a rotura del terreno
HYD	Estado Límite Último debido a filtraciones dentro del terreno
ICSMFE	International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering
IRE	Índice de Repercusión Económica
ISA	Índice de Repercusión Social y Ambiental
ISOPT	International Symposium on Penetration Testing
ISRM	International Society for Rock Mechanics
ITGE	Instituto Tecnológico y Geominero de España
MSK	Escala de Intensidad Sísmica (Medvedev, Sponheuer y Karnik)
NAVFAC	Naval Facilities Engineering Command (U.S.A.)
NLT	Normas de Laboratorio del Transporte
OCR (RSC)	Razón de sobreconsolidación
PSA	Property Services Agency (U.K.)
ROM	Recomendaciones para Obras Marítimas
RQD	Rock Quality Designation
SPT	Standard Penetration Test
STR	Estado Límite Último debido a agotamiento de capacidad estructural
UNE	Normas Españolas
UPL	Estado Límite Último debido a exceso de subpresión

1.8 REFERENCIAS DOCUMENTALES

Para la preparación de esta ROM se han consultado varias publicaciones técnicas, principalmente aquellas dedicadas a objetivos similares (normativas, documentos publicados por comités especializados, etc.). Estos documentos de referencia son los que se indican a continuación. El ingeniero puede encontrar en ellos aclaraciones complementarias.

De los numerosos libros y artículos publicados que tengan relación con este tema únicamente se refieren aquellos que, por su difusión en España o por su directa aplicación a la geotecnia de las obras marítimas, se han creído de mayor interés.

En esta ROM se recomiendan, para cada tema concreto, soluciones o procedimientos de análisis que son debidos a otros autores. Cuando es así, se hace una referencia puntual de manera que se conozca la procedencia de la idea y se pueda ampliar en sus orígenes.

- ◆ **Acciones en el Proyecto. Recomendaciones para Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.2-90).** Dirección General de Puertos y Costas. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (Abril 1990).
- ◆ **British Standard Code of Practice for Maritime Structures.** BS 6349. BSI.
- ◆ **Canadian Foundation Engineering Manual.** Canadian Geotechnical Society (1992).
- ◆ **Classification of Soils and Rocks to be Dredged.** Boletín nº 47. PIANC. (1984).
- ◆ **Code of Practice for Site Investigations.** BS 5930. BSI. (1999).

- ◆ **EAU. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures, Harbours and Waterways.** Sociedad de Ingeniería Portuaria y Alemana de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones (2004).
- ◆ **Eurocódigo 7. Parte I.** Proyecto Geotécnico. Reglas Generales. (2004).
- ◆ **Eurocódigo 8. Parte 5.** Estructuras en Zonas Sísmicas. Proyecto de Cimentaciones. Estructuras de Contención y Aspectos Geotécnicos (1998).
- ◆ **Final Report of the International Commission for the Study of Locks.** Boletín nº 55. AIPCN (1986).
- ◆ **Geotecnia y Cimientos I. Propiedades de los suelos y de las rocas.** Jiménez Salas y otros. Editorial Rueda (1975).
- ◆ **Geotecnia y Cimientos II. Mecánica del suelo y de las rocas.** Jiménez Salas y otros. Editorial Rueda (1981).
- ◆ **Geotecnia y Cimientos III. Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia.** Jiménez Salas y otros. Editorial Rueda (1980).
- ◆ **Instrucción de Hormigón Estructural (EHE).** Ministerio de Fomento. (Diciembre 1998).
- ◆ **Manual de Cálculo de Tablestacas (Hoesch).** Traducción publicada por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (1991).
- ◆ **Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering.** Part 5.2. Geotechnical Interactions. Publicación especial nº 83. CIRIA (1991).
- ◆ **Marine Geotechnics.** H. G. Poulos. Editorial Unwin Hyman Ltd. Londres (1988).
- ◆ **NCSE-02 Norma de construcción sismorresistente.** Parte General y Edificación (Septiembre 2002).
- ◆ **Procedimiento General y Bases de Cálculo en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias (ROM 0.0).** Puertos del Estado. Ministerio de Fomento. (Diciembre 2001).
- ◆ **Rules for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures.** Det Norske Veritas (1978).
- ◆ **Site Investigation Manual.** Guía técnica de ingeniería civil nº 35 del P.S.A. y Publicación especial nº 25 del CIRIA (1983).
- ◆ **Soil Investigation and Geotechnical Design for Maritime Structures.** NS 3481. Norma Noruega (Feb. 1989).
- ◆ **Soil Mechanics Design Manual 7.1.** NAVFAC DM 7-1 (1982)
- ◆ **Soil Mechanics in Engineering Practice.** Terzaghi, Peck and Mesri. John Wiley and Sons, Inc. (1996).
- ◆ **Supervision and Control of Long Lateral Embankments.** Boletín nº 69. PIANC (1990).
- ◆ **Tables de Poussée et de Butée des Terres.** Kerisel et Absi. Presses de l'école nationale de Ponts et Chaussées. Francia (2003).
- ◆ **Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan.** The Overseas Coastal Area Development Institute of Japan, English version 2002.

Capítulo II
Investigación Geotécnica



Índice Capítulo II

CAPÍTULO II. INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA

2.1. INTRODUCCIÓN	55
2.2. PROPIEDADES DEL TERRENO	55
2.2.1. Granulometría	55
2.2.2. Índice de poros y porosidad	56
2.2.3. Humedad y grado de saturación	57
2.2.4. Densidades y pesos específicos	57
2.2.5. Plasticidad	58
2.2.6. Permeabilidad	58
2.2.7. Comportamientos drenado y no drenado	59
2.2.8. Resistencia de los suelos	60
2.2.8.1. Parámetros de resistencia en presiones efectivas	60
2.2.8.2. Suelos no saturados	61
2.2.8.3. Resistencia al corte sin drenaje	61
2.2.9. Resistencia de las rocas	62
2.2.9.1. Distancia media entre diaclasas	63
2.2.9.2. Número de fracturas por unidad de volumen	64
2.2.9.3. Persistencia de la fracturación	64
2.2.9.4. Apertura de las litoclasas	65
2.2.9.5. Rugosidad	65
2.2.9.6. Resistencia a compresión simple	65
2.2.9.7. Grado de alteración	66
2.2.10. Deformabilidad del terreno	66
2.2.10.1. El modelo elástico	66
2.2.10.2. El modelo edométrico	67
2.2.10.3. El modelo de Winkler	69
2.2.10.4. Otras formas de considerar la deformación del terreno	69
2.2.11. Otras características	69
2.3. OBJETIVOS Y FASES DEL RECONOCIMIENTO DEL TERRENO	70
2.4. ESTUDIO PRELIMINAR	72
2.4.1. Información preexistente	72
2.4.2. Informe geotécnico preliminar	73
2.4.3. Parámetros geotécnicos preliminares	75
2.5. PROGRAMACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS	77
2.6. RECONOCIMIENTOS GEOFÍSICOS	78
2.7. SONDEOS MECÁNICOS	79
2.7.1. Ejecución de sondeos	79
2.7.2. Profundidad de los reconocimientos	80
2.8. POZOS, CALICATAS Y ZANJAS	83

2.9.	ENSAYOS «IN SITU»	84
2.9.1.	Ensayo de penetración estándar. SPT	84
2.9.2.	Penetrómetros dinámicos	87
2.9.3.	Penetrómetros estáticos	89
2.9.4.	El piezocono. CPTU	91
2.9.5.	Correlación entre ensayos de penetración	93
2.9.6.	Presiómetros y dilatómetros	94
2.9.7.	Ensayos de molinete	97
2.9.8.	Ensayos de placa de carga	97
2.9.9.	Ensayos de permeabilidad en sondeos y calicatas	97
2.9.10.	Pruebas de campo y otros ensayos «in situ»	97
2.10.	TOMA DE MUESTRAS	98
2.11.	ENSAYOS DEL LABORATORIO	100
2.11.1.	Ensayos de identificación de suelos	100
2.11.2.	Ensayos de compresión simple de suelos	100
2.11.3.	Corte directo de suelos, gravas y escolleras finas	101
2.11.4.	Ensayo triaxial de suelos	101
2.11.5.	Ensayos edométricos	102
2.11.6.	Ensayos de compactación	102
2.11.7.	Permeabilidad	103
2.11.8.	Ensayos dinámicos	103
2.11.9.	Ensayos de rocas	103
2.11.10.	Otros ensayos de laboratorio	104
2.12.	INTENSIDAD DE RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO	104
2.12.1.	Tipos de reconocimiento	106
2.12.2.	Número de puntos de investigación en los reconocimientos detallados	106
2.12.3.	Reconocimientos reducidos y mínimos	109
2.12.4.	Número de ensayos de laboratorio	110
2.13.	INFORME GEOTÉCNICO	111
2.13.1.	Anejo de trabajos de campo	111
2.13.2.	Anejo de ensayos de laboratorio	112
2.13.3.	Memoria	112
2.14.	RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA OBRAS O PROYECTOS DE CATEGORÍA A	113
2.14.1.	Identificación de diferentes terrenos	113
2.14.2.	Parámetros geotécnicos comunes	114
2.14.3.	Variabilidad de los parámetros geotécnicos	115
2.14.4.	Funciones probabilísticas recomendadas	116
2.15.	COSTE DE LOS RECONOCIMIENTOS DEL TERRENO	117
APÉNDICE I. FÓRMULAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN POZOS Y SONDEOS.....		117
A1.1.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN SONDEOS	117
A1.1.1.	Ensayos Lefranc	117
A1.1.2.	Ensayos Lugeon	117
A1.1.3.	Ensayos con carga variable	118
A1.2.	INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE BOMBEO	119
A1.2.1.	Ensayos en régimen permanente	119
A1.2.2.	Ensayos en régimen transitorio	119
A1.2.3.	Inversión del ensayo de bombeo	120
A1.2.4.	Niveles dentro del pozo	120

2.1 INTRODUCCIÓN

El proyecto geotécnico nace del conocimiento del terreno y por ese motivo esta parte de la ROM 0.5, que se dedica a la investigación geotécnica, es la clave y el fundamento de cualquier proyecto que se asiente en el terreno y/o utilice este elemento como material de construcción.

Se comenzará la Parte 2 describiendo los parámetros geotécnicos, que son aquellos números (a veces se trata de calificaciones) que la técnica actual usa en mayor medida para describir el comportamiento del terreno. Dada la enorme cantidad de parámetros existentes (existen muchos modelos de comportamiento con parámetros geotécnicos específicos) sólo se hará mención de aquellos que en la práctica habitual son de uso más frecuente. Esto no excluye la necesidad de uso de modelos, parámetros y procedimientos específicos en casos particulares que no puedan resolverse con los métodos sencillos que se describen en esta ROM.

La Parte 2 continúa con la descripción de las técnicas de reconocimiento más comunes, tanto para las prospecciones de campo como para los ensayos de laboratorio que se requieren para caracterizar el terreno.

La Parte 2 concluye con las recomendaciones que se han creído oportunas para ayudar a redactar el documento clave de la investigación del terreno: el Informe Geotécnico.

2.2 PROPIEDADES DEL TERRENO

Los reconocimientos geotécnicos y particularmente los ensayos de campo y laboratorio están destinados a determinar una serie de parámetros del terreno que después formarán parte importante del análisis y en los cálculos necesarios para el estudio de diversos problemas. Las propiedades y parámetros de geotécnicos de mayor uso así como su obtención a través de los ensayos son los que se describen y comentan a continuación.

2.2.1 Granulometría

La separación de las partículas de distintos tamaños de los suelos en laboratorio y la determinación de su proporción relativa en el total de la muestra permite conocer ciertos aspectos del comportamiento. En el análisis de distintos problemas geotécnicos es relativamente frecuente utilizar los siguientes tamaños y proporciones deducidos de la curva granulométrica.

$D_{m\acute{a}x}$	= tamaño máximo.
D_x	= tamaño del tamiz que deja pasar el x por ciento del suelo. Son particularmente interesantes D_{85} , D_{60} , D_{50} , D_{15} y D_{10} .
Diámetro eficaz	= se suele llamar así al D_{10} .
Porcentaje de finos	= tanto por ciento del suelo que pasa por el tamiz 0,080 UNE cuya apertura de malla es 0,080 mm. Cuando se trata de escolleras o pedraplenes se suele denominar también porcentaje de finos al pasante por el tamiz de 1" (25 mm).
Contenido en arcillas	= se denomina así al porcentaje del suelo que, en ensayos granulométricos por sedimentación, tiene un diámetro aparente inferior a dos micras. En algunos trabajos ese tamaño se fija en cinco micras. El primer criterio es el recomendado en esta ROM.
Coefficiente de uniformidad	= es el cociente D_{60}/D_{10} .

En función de los tamaños de partículas, D, los suelos se clasifican en:

- a. Gravas $D \geq 2$ mm.
- b. Arenas $2 \text{ mm} > D > 0,08$ mm.
- c. Limos $0,08 \text{ mm} \geq D > 0,002$ mm.
- d. Arcillas $D \leq 0,002$ mm.

Los suelos naturales suelen ser mezclas, en distintas proporciones, de varios de los tipos mencionados. Para definir cualitativamente esas mezclas se suele añadir al nombre del componente esencial (por ejemplo arcilla) algún calificativo (por ejemplo limosa). Se debe entender que tales calificativos obedecen a la siguiente escala aproximada.

Calificativo	Proporción (% en peso)
Indicios de	5% – 10%
Algo + sufijo oso/osa	10% – 20%
Bastante + sufijo oso/osa	20% – 35%
Sufijo oso/osa	35% – 50%

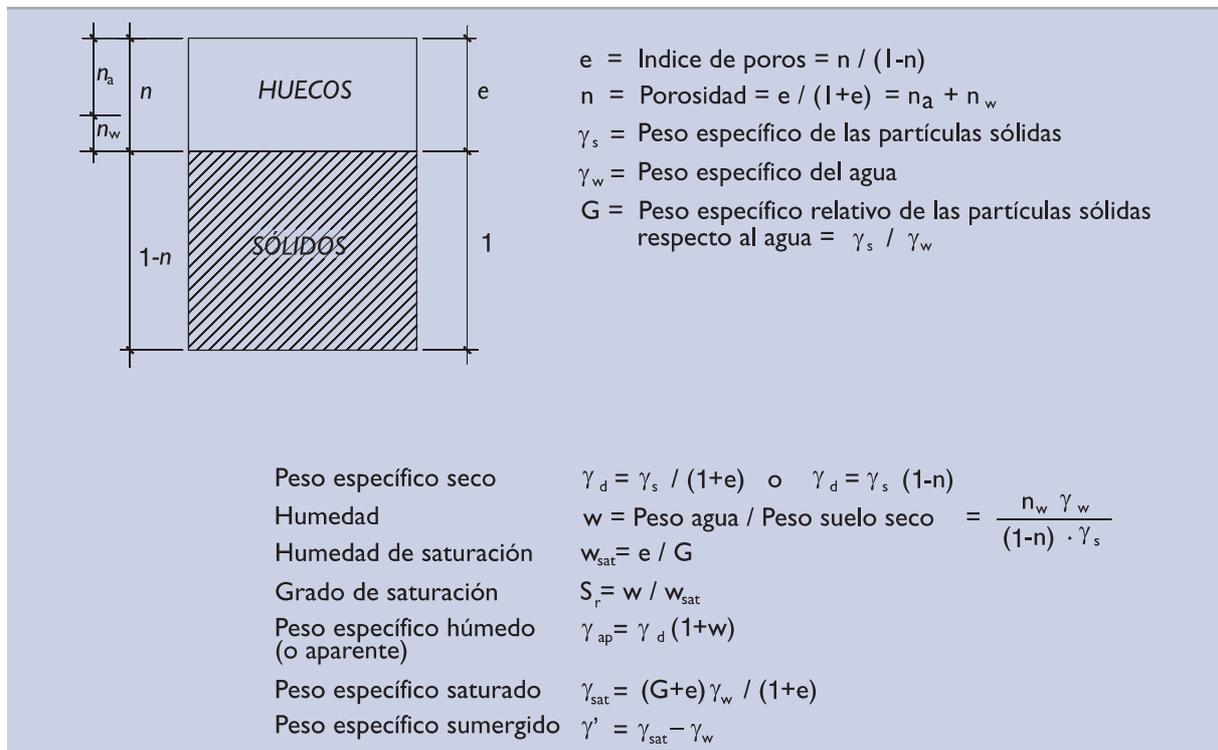
2.2.2 Índice de poros y porosidad

Está muy extendido el modelo conceptual que se indica en la Fig. 2.2.1, donde la materia sólida de los suelos o las rocas se considera segregada de los poros de manera que, cuando el volumen de sólidos es igual a la unidad, el conjunto de todos los poros vale “e”, letra con la que se denomina al concepto “índice de poros”. Es menos frecuente el uso del sinónimo “índice de huecos”.

Existe una forma alternativa de comparar los volúmenes ocupados por zonas sólidas y huecos (reellenos o no de fluidos) dentro de los suelos y las rocas; es la porosidad, que se suele designar con la letra “n” y que tiene una clara correlación con el índice de poros, tal como se indica en la Fig. 2.2.1 ya mencionada.

En rocas es frecuente distinguir dos partes de la porosidad, una que está formada por los poros accesibles en muestras de laboratorio y otra inaccesible, desconectada de los bordes exteriores.

Figura 2.2.1. Variables de estado más comunes



* La palabra “densidad” se utiliza en la práctica habitual como sinónimo de “peso específico”.

La determinación del índice de poros o de la porosidad se hace siempre en laboratorio y de una manera indirecta, ya que se determina el peso específico de las partículas sólidas por una parte y el peso específico seco (o densidad seca) por otra. La relación entre estos parámetros se recoge en la mencionada Fig. 2.2.1.

2.2.3 Humedad y grado de saturación

Se denomina “humedad” de un terreno al cociente entre el peso del agua y el peso del terreno seco. Se puede expresar esta relación en tanto por uno o en tanto por ciento.

Cuando todos los huecos del terreno están llenos de agua la humedad correspondiente es la “humedad de saturación”.

Por debajo del nivel freático el terreno suele estar saturado, mientras que en sus proximidades o por encima suele estar parcialmente saturado. El grado de saturación “ S_r ” mide, en una escala de 1 a 100, el porcentaje de huecos que están llenos de agua y que coincide con el cociente entre la “humedad” y la “humedad de saturación” multiplicado por cien. En ocasiones el grado de saturación se expresa en tanto por 1 en lugar de en tanto por ciento.

2.2.4 Densidades y pesos específicos

La palabra “densidad” se utiliza vulgarmente para denominar también el concepto de “peso específico”. Así se hace en la práctica habitual.

En esta ROM se utilizará la palabra “densidad” con su significación real de masa por unidad de volumen, y se utilizará, para representarla, la letra griega ρ , en lugar de γ , que se reserva para los pesos específicos.

Los pesos específicos más usuales para cálculos geotécnicos son:

- γ_d = peso específico seco. Correspondiente al grado de saturación nulo.
- γ_{ap} = peso específico húmedo o aparente. Correspondiente al estado de saturación que exista en el terreno.
- γ_{sat} = peso específico saturado. Corresponde al estado de saturación total.
- γ' = peso específico sumergido. Corresponde al peso específico virtual que el terreno saturado tendría inmerso en agua al descontar al peso de la muestra el empuje ascendente del agua.

La relación entre estas cuatro variables y las variables básicas anteriores se especifica en la Fig. 2.2.1.

El concepto de “densidad relativa” de una arena se utiliza para comparar su densidad real con las densidades máximas y mínimas que pueden obtenerse en el laboratorio con esa misma arena. Su definición es la siguiente:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \cdot 100$$

siendo:

- D_r = densidad relativa expresada en %.
- e = índice de poros.
- $e_{m\acute{a}x}$ = índice de poros que corresponde a $\rho_{d\acute{m}i{n}}$ (Norma UNE 103105:1993).
- $e_{m\acute{i}n}$ = índice de poros que corresponde a $\rho_{d\acute{m}\acute{a}x}$ (Norma UNE 103106:1993).

Comentario: En ocasiones se utiliza el “índice de densidad”, I_D , como parámetro de medida de la compacidad relativa de los suelos granulares. Su definición, en algunos textos (Geotecnia y Cimientos I, por ejemplo), coincide con la que aquí se hace de densidad relativa ($D_r = I_D$). Existen otros textos (Manual of Estimating Soil Properties for Foundation Design. EPRI EL-6800. Cornell University. 1990, por ejemplo), donde se define $I_D = D_r \cdot \rho_d / \rho_{d\acute{m}\acute{a}x}$

En esta ROM, no se utiliza explícitamente el concepto de índice de densidad para ninguna aplicación concreta. Si el ingeniero ha de usar este concepto por algún motivo, se recomienda que lo haga como sinónimo del concepto “densidad relativa”.

2.2.5 Plasticidad

El cambio de propiedades de los suelos arcillosos a medida que su humedad aumenta se suele caracterizar por dos estados límite, denominados límites de Atterberg.

- ◆ Límite plástico, LP: humedad mínima del suelo en estado semisaturado que permite su moldeo sin que aparezcan grietas.
- ◆ Límite líquido, LL: humedad del suelo en estado saturado que le hace comportarse como un fluido viscoso.

La determinación de las humedades correspondientes a esos dos estados límite es un ensayo rutinario en todos los laboratorios de suelos.

El rango de humedades entre esos dos comportamientos se mide mediante el:

$$\text{Índice de plasticidad, IP} = \text{LL} - \text{LP}$$

Un determinado suelo arcilloso puede encontrarse con humedades variables entre esos dos estados límite o incluso más allá de cualquiera de ellos. La situación relativa de la humedad, w , respecto a esos estados límite se mide con los siguientes índices:

$$\text{Índice de fluidez} = \text{IF} = \frac{w - \text{LP}}{\text{IP}}$$

$$\text{Índice de consistencia} = \text{IC} = \frac{\text{LL} - w}{\text{IP}}$$

Estos cinco datos asociados a suelos arcillosos no suelen ser parámetros de cálculo. Son utilizados sin embargo para correlacionar propiedades e identificar distintos tipos de suelos.

2.2.6 Permeabilidad

Se entiende como permeabilidad la cualidad del terreno que permite el flujo de agua o de otro fluido a través de su seno. Generalmente la medida de esta propiedad es complicada pero en algunos casos concretos puede realizarse de manera sencilla.

En esta ROM se considera aceptable admitir la ley de Darcy para estudiar únicamente problemas de flujo laminar de agua en suelos saturados. El caudal de agua a través de una sección de área unidad es denominada velocidad de descarga o simplemente velocidad “ v ”. Esta velocidad (menor siempre que la velocidad media real del agua en el terreno) se considera proporcional al gradiente hidráulico “ I ” definido como se indica en el párrafo siguiente. El coeficiente de proporcionalidad, cambiado de signo, se denomina “coeficiente de permeabilidad” y se representa usualmente con la letra “ k ”.

$$v = -k \cdot I$$

El gradiente “ I ” es la derivada espacial del potencial escalar, ϕ , que en los problemas geotécnicos se define:

$$\phi = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

Donde:

- γ_w = peso específico del agua.
- u = presión del agua intersticial.
- z = cota del agua sobre un plano horizontal de referencia.

En situaciones de suelos con permeabilidad anisótropa la relación entre los vectores velocidad y gradiente es, en lugar de un número, una matriz cuadrada (problemas bidimensionales) o cúbica (problemas tridimensionales).

La permeabilidad puede determinarse mediante ensayos en sondeos (tipo Lefranc), mediante ensayos de bombeo y mediante ensayos de laboratorio (distintos tipos de permeámetros y ensayos edométricos).

Las permeabilidades típicas de los distintos terrenos se incluyen en la Tabla 2.4.3.

2.2.7 Comportamientos drenado y no drenado

Siempre que en un terreno, total o parcialmente saturado, se modifica el estado tensional se produce algún movimiento de sus partículas y el agua puede variar su presión transitoriamente y después equilibrarse hasta una situación hidrostática (de potencial uniforme) o hasta un régimen de filtración permanente. Ese cambio puede ocurrir pronto o tarde cuando se compara con el tiempo de estudio y ese aspecto tiene especial importancia en el análisis de los distintos problemas geotécnicos.

Es frecuente considerar, en este tema, dos situaciones límites:

- ◆ Sin drenaje. Se denominan situaciones sin drenaje aquellas en las que el agua del suelo no puede moverse y adecuarse al nuevo estado de cargas. Existen, por lo tanto, presiones intersticiales que intentan desplazar el agua hacia posiciones de equilibrio.
- ◆ Con drenaje. Se denominan situaciones con drenaje aquellas en las que el potencial del agua intersticial alcanza instantáneamente, en cada momento, una distribución permanente.

La posibilidad de ocurrencia de ambas situaciones y el estudio de las consecuencias de cada una de ellas es obligado en el análisis de cualquier problema geotécnico.

Al modificar las condiciones de carga en terrenos permeables el agua se mueve rápidamente y por lo tanto no existe período de consolidación. Las presiones intersticiales se generan y disipan en tiempos muy breves. Salvo en el caso especial de las acciones cíclicas o impulsivas (sismos, acciones del oleaje, etc.) se consideran infinitamente permeables, al resto de efectos, todos los terrenos cuyo coeficiente de permeabilidad es superior a 10^{-2} cm/s. No sería necesario considerar la situación sin drenaje en esas circunstancias.

En suelos arcillosos, cuya permeabilidad sea inferior a 10^{-4} cm/s, será siempre recomendable considerar que se puede producir la situación “sin drenaje”; esto es, de movimiento nulo del agua respecto al suelo.

En terrenos con permeabilidad intermedia entre 10^{-2} y 10^{-4} cm/s el ingeniero decidirá sobre la necesidad de contemplar la situación extrema “sin drenaje” teniendo en cuenta la geometría del terreno y el tipo y plazo de las acciones impuestas. En caso de dudas puede ser recomendable estimar, previamente, la amplitud del plazo de consolidación según se indica en 3.4.8.

Para la consideración de comportamiento drenado o no drenado del suelo frente a la actuación del oleaje o de otras cargas cíclicas o impulsivas se dan recomendaciones en los apartados 3.4.11 y 3.10. de esta ROM.

2.2.8 Resistencia de los suelos

La resistencia al corte de un suelo depende, entre otros factores, de las características de la carga. En lo que sigue se considera la situación más común de cargas cuasi-estáticas. La resistencia del terreno en condiciones de carga cíclica e impulsiva se considera en el apartado 3.10.

2.2.8.1 Parámetros de resistencia en presiones efectivas

Para la gran mayoría de los cálculos geotécnicos que se realicen en suelos saturados es común suponer válida la ley de Coulomb.

$$\tau = \sigma' \operatorname{tg} \phi + c$$

donde:

- τ = esfuerzo de corte que produce la rotura.
- σ' = presión efectiva normal al plano.
- ϕ = ángulo de rozamiento interno.
- c = cohesión.

Además, es frecuente, y se recomienda en esta ROM, admitir el principio de la presión efectiva de Terzaghi para calcular la presión efectiva en suelos saturados.

$$\sigma' = \sigma - u$$

donde:

- σ = presión total.
- u = presión intersticial.

El ángulo de rozamiento ϕ y la cohesión c se obtienen de ensayos lentos donde se permite el drenaje totalmente (ensayos triaxiales CD, con consolidación previa y rotura con drenaje, por ejemplo) o ensayos donde se controlan las presiones intersticiales y se descuentan al interpretarlos (ensayos triaxiales CU, con consolidación previa y rotura sin drenaje pero midiendo las presiones intersticiales, por ejemplo).

En la mayoría de los suelos y a efectos prácticos, se puede suponer que el ángulo de rozamiento es constante. En realidad este parámetro depende de la intensidad de la carga.

En las arenas cementadas o en arenas formadas por carbonatos orgánicos (arenas conchíferas, foraminíferas, coralinas, etc.) y también en escolleras este efecto es particularmente notable. El ángulo de rozamiento interno disminuye cuando la presión efectiva media p' aumenta. Este efecto desfavorable, que el ingeniero debe analizar en cada caso, se suele representar por la expresión:

$$\phi = \phi_0 - b \cdot \log_{10} \frac{p'}{p'_0}$$

donde:

- ϕ = ángulo de rozamiento correspondiente a la presión efectiva media p' .
- ϕ_0 = ángulo de rozamiento correspondiente a la presión efectiva media de referencia p'_0 .
- b = disminución del ángulo de rozamiento que se produce al multiplicar por diez la presión efectiva media.

Se advierte que este efecto puede ser importante, ya que el parámetro “b” medido en algunos suelos carbonatados ha resultado ser superior a 15°.

Este descenso se atribuye, en general, a la rotura de los granos del suelo, que en arenas carbonatadas ocurre a bajas presiones mientras en arenas silíceas ocurre a presiones superiores a los 20 MPa.

2.2.8.2 Suelos no saturados

Para suelos no saturados se recomienda en esta ROM utilizar una expresión similar:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi_{\text{ap}} + c_{\text{ap}}$$

donde:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{ap}}, c_{\text{ap}} &= \text{rozamiento y cohesión aparentes en condiciones no saturadas.} \\ \sigma &= \text{presión total en el plano de rotura.} \end{aligned}$$

El ángulo de rozamiento ϕ_{ap} y la cohesión c_{ap} con suelos no saturados es de menor uso en la práctica y se obtendría de ensayos de campo y laboratorio realizados con muestras o en terrenos con el mismo grado de saturación parcial objeto de interés.

2.2.8.3 Resistencia al corte sin drenaje

Para conocer mejor el comportamiento de los suelos arcillosos o limosos y, en general, de todos aquellos que tienen permeabilidad baja, suele ser necesario investigar la resistencia al corte en aquellas situaciones en las que el drenaje está impedido. Con ello se tratan de simular las situaciones “sin drenaje” descritas en 2.2.7.

En esas condiciones la resistencia del suelo se puede aproximar mediante una expresión similar a la ley de Coulomb.

$$s_u = c_u + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi_u$$

donde:

$$\begin{aligned} \phi_u &= \text{ángulo de rozamiento aparente en la rotura sin drenaje.} \\ c_u &= \text{cohesión aparente en la rotura sin drenaje.} \\ s_u &= \text{resistencia al corte sin drenaje.} \\ \sigma &= \text{presión total en el plano de rotura.} \end{aligned}$$

Es frecuente, en el estudio de situaciones de duración corta respecto al plazo de consolidación del suelo, sin posibilidad de drenaje parcial del agua, suponer que $\phi_u = 0$ ya que así resulta en ensayos triaxiales realizados con arcillas saturadas; la resistencia al corte es independiente de la presión de confinamiento aplicada.

La resistencia al corte sin drenaje se puede medir en campo con ensayos in situ (molinete y penetración estática, por ejemplo) o en laboratorio (ensayos triaxiales UU realizados con muestras inalteradas, por ejemplo).

En ocasiones interesa conocer cuál hubiera sido esa resistencia si el suelo estuviera más consolidado (esto es, con mayores densidades) tal como podría ocurrir en zonas más profundas del terreno. También puede aumentar la densidad y por lo tanto la resistencia al corte sin drenaje, después de cierto tiempo, en zonas sobrecargadas por las obras en estudio.

Para investigar esos casos se pueden consolidar las muestras de manera artificial en el laboratorio hasta alcanzar la situación que se quiere simular y después proceder a su rotura sin drenaje.

La resistencia al corte sin drenaje de los suelos cohesivos que forman los fondos marinos o costeros, es, en muchas ocasiones, un parámetro crítico de proyecto. Su determinación debe hacerse con la máxima precaución, pues el resultado obtenido puede tener repercusiones trascendentes en el tipo de obra a realizar.

La resistencia al corte sin drenaje de suelos arcillosos (o fangosos) normalmente consolidados crece con la profundidad a medida que lo hace la presión efectiva vertical. El ingeniero debe buscar, en sus exploraciones geotécnicas, esa correlación. Como referencia puede utilizar la ley dada por la siguiente expresión:

$$s_u = \left(0,11 + 0,3 \cdot \frac{IP}{100} \right) \cdot \sigma'_v \geq 0,15\sigma'_v$$

donde:

- s_u = resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo normalmente consolidado.
- IP = índice de plasticidad expresado en %.
- σ'_v = presión efectiva vertical que actúa sobre el plano horizontal donde se determina la resistencia al corte.

Es posible medir resistencias al corte incluso menores que la indicada por la ecuación anterior. Esa situación puede indicar que el terreno está aún en proceso de consolidación.

En los suelos costeros o en los fondos marinos pueden darse situaciones de sobreconsolidación. Esa sobreconsolidación se mide mediante el parámetro OCR (ver 2.2.10.2).

La sobreconsolidación puede alcanzarse debido a una carga previa que después se retira. También puede ser el resultado de ciertos procesos de envejecimiento o de cementación o incluso de densificación causada por las cargas de corte que experimentan los fondos marinos debido al movimiento del agua. El efecto de estos procesos puede simularse en los cálculos suponiendo una carga de preconsolidación equivalente.

La sobreconsolidación aumenta la resistencia al corte sin drenaje de los suelos arcillosos (o fangosos). Existe una relación teórica que indica que ese crecimiento es:

$$s_u^* = s_u \cdot OCR^{0,8}$$

donde:

- s_u^* = resistencia al corte sin drenaje de un suelo arcilloso sobreconsolidado.
- OCR = razón de sobreconsolidación (ver 2.2.10.2).
- s_u = resistencia al corte del mismo suelo si estuviera normalmente consolidado.

El ingeniero investigará el cumplimiento de esta ley si en su proyecto intervienen suelos de esta naturaleza. La expresión que se indica puede servirle como marco de referencia.

Para suelos granulares, la resistencia en condiciones no drenadas, que pueden darse en algunas circunstancias de carga rápida, puede representarse mediante la Ley de Coulomb en presiones efectivas, introduciendo en los cálculos el valor de las presiones intersticiales generadas en esta situación.

2.2.9 Resistencia de las rocas

Las rocas se presentan en la naturaleza con cierta fracturación y alteración. Normalmente la resistencia que conviene conocer es aquella que representa al volumen de roca afectado por la obra. Esta resistencia depende de varios parámetros además de los ya mencionados (densidad y porosidad).

Las características principales que determinan el comportamiento de las formaciones rocosas son:

- ◆ La naturaleza de la roca.
- ◆ El diaclasamiento y las características de sus juntas.
- ◆ El grado de alteración.

Se entiende como naturaleza de la roca no sólo su composición mineralógica sino también su origen geológico, ya que esta última condición puede permitir la utilización de información de detalle entre rocas de similar origen.

Para caracterizar el diaclasamiento de la roca conviene definir cada una de las familias de diaclasas que la afectan. Esa caracterización puede hacerse con ayuda de los parámetros que se indican en la Tabla 2.2.1.

Tabla 2.2.1. Caracterización de litoclasas. (Adaptación de las recomendaciones de la ISRM*)

Aspecto	Parámetro significativo	Observaciones
Nº de familias		Cada familia debe tener una génesis similar y unas características parecidas.
Orientación	Dirección. Buzamiento.	Agrupación por familias con orientación semejante.
Espaciamiento	Distancia media entre diaclasas, s.	Un dato para cada familia. Ver apartado 2.2.9.1.
Índice de fracturación	Nº de fracturas por unidad de volumen, J_v .	Un dato global representativo de la zona explorada. Ver apartado 2.2.9.2.
Continuidad	Extensión de una familia de litoclasas dentro del macizo, P.	Se mide en unidades de longitud. También se denomina "persistencia". Ver apartado 2.2.9.3.
Apertura	Distancia entre los dos bloques separados por la litoclasa, a.	Ver apartado 2.2.9.4.
Rugosidad	Medida cualitativa de las desviaciones de la superficie de la junta respecto a un plano.	Ver apartado 2.2.9.5.
Tipo de relleno	Descripción del material que rellena la junta, si existe alguno.	Se describe el suelo según lo indicado para los suelos en el apartado 2.2.
Resistencia de la roca	Resistencia a compresión simple en las paredes sanas a uno y otro lado de la fractura.	Ver apartado 2.2.9.6.
Condición hidráulica	Descripción de la posible presencia de agua en la junta.	Suele describirse con alguna de las siguientes palabras: seca, goteando, con flujo de agua...

(*) ISRM (1981). "Rock Characterization, Testing and Monitoring: ISRM Suggested Methods". Ed. Brown E.T. Pergamon Press.

2.2.9.1 Distancia media entre diaclasas

La capacidad portante de las formaciones rocosas, tanto en cimentaciones superficiales como en cimentaciones profundas, depende, entre otros factores, de la separación media entre las litoclasas.

Cada familia de diaclasas suele tener una orientación semejante y un hábito similar de separación entre ellas que se representa con el valor medio de la distancia entre dos litoclasas consecutivas.

Es relativamente frecuente definir de manera cualitativa el espaciamiento. Esas definiciones deben ser compatibles con las separaciones medias que se indican a continuación.

Calificativo	Espaciamiento
Especialmente pequeño	< 2 cm
Muy pequeño	2 a 6 cm
Pequeño	6 a 20 cm
Moderado	20 a 60 cm
Amplio	60 a 200 cm
Muy amplio	200 a 600 cm
Especialmente amplio	> 600 cm

2.2.9.2 Número de fracturas por unidad de volumen

Normalmente, las formaciones rocosas están afectadas por varias familias de litoclasas, lo que hace que un determinado volumen del macizo rocoso esté afectado por varias diaclasas. Se denomina con el índice " J_v " el valor medio del número de diaclasas que atraviesan un volumen de un metro cúbico.

La equivalencia entre los valores cualitativos que se emplean en las descripciones geológicas y la realidad física debe atenderse a la relación que se indica a continuación.

Calificativo	Índice de fracturación, J_v (n° de diaclasas por m ³)
Masivo	< 1
Poco diaclasado	1 a 3
Medianamente diaclasado	3 a 10
Bastante diaclasado	10 a 30
Muy diaclasado	30 a 60
Triturado	> 60

2.2.9.3 Persistencia de la fracturación

Una determinada diaclasa tendrá siempre una extensión limitada. Existirán "fallas" que pueden dividir la roca a lo largo de varios kilómetros y diaclasas que partan el macizo rocoso en sólo algunos metros.

Se denomina como "persistencia" la longitud mayor o máxima extensión en alguna dirección de una determinada litoclase. Normalmente las litoclasas de una misma familia tienen una persistencia similar.

De modo cualitativo y en función de la persistencia, los adjetivos que suelen utilizarse para describir este parámetro son los que se indican a continuación.

Calificativo	Persistencia
Muy pequeña	< 1 m
Escasa	1 a 3 m
Media	3 a 10 m
Alta	10 a 20
Muy alta	> 20 m

2.2.9.4 Apertura de las litoclasas

La distancia entre las caras opuestas de una determinada litoclasa se denomina “apertura”.

Los valores usuales de las aperturas y los calificativos que conviene utilizar para describirlas son los que se indican en la relación que sigue.

Calificativo general	Calificativo de detalle	Apertura
Juntas cerradas	Muy cerradas Cerradas Parcialmente abiertas	< 0,1 mm 0,10 a 0,25 mm 0,25 a 0,50 mm
Macizo rocoso agrietado	Abiertas Bastante abiertas Apertura amplia	0,50 a 2,50 mm 2,50 a 10 mm > 1 cm
Juntas abiertas	Apertura muy amplia Apertura especialmente amplia Estructura hueca	1 a 10 cm 10 a 100 cm > 1 m

2.2.9.5 Rugosidad

Las diaclasas que afectan a las rocas suelen ser superficies que se aproximan, en primera instancia, a planos. De esa forma se describen con los parámetros geométricos de dirección y buzamiento. Pero la realidad física puede ser más compleja.

Las fallas y las diaclasas de gran persistencia (alta o muy alta) deben describirse mediante una zonificación de su trazado completo en partes de rugosidad similar.

Aquellas litoclasas que tengan persistencia menor (media, escasa o muy pequeña) y las zonas homólogas de las litoclasas más persistentes deben caracterizarse al menos cualitativamente en alguno de los tres grupos siguientes:

- Escalonada, cuando en conjunción con otras diaclasas el plano de diaclasamiento presenta saltos.
- Ondulada, cuando la forma de la superficie de la diaclasa se asemeja a la forma de una onda.
- Plana, cuando la dirección y el buzamiento de la superficie de separación de la roca tienen escasa variación.

En todos los casos, además, y atendiendo a la escala menor (longitudes del orden del centímetro) las juntas deben clasificarse como rugosas, suaves o especulares, según sea más o menos pronunciada su rugosidad.

2.2.9.6 Resistencia a compresión simple

La resistencia de probetas talladas en laboratorio, sometidas a compresión uniaxial, es uno de los parámetros de mayor interés para caracterizar las rocas.

En ocasiones este parámetro está lejos de ser determinante y en consecuencia puede ser suficiente caracterizarlo mediante procedimientos indirectos. La relación que debe existir entre los procedimientos aproximados de determinación de la resistencia a compresión simple, los calificativos que se usan y la resistencia real son los que se indica a continuación.

Procedimiento indirecto	Calificativo	Valor estimado (MPa)
Se puede rayar con la uña.	Especialmente débil	< 1
Se rompe con golpes de martillo moderados. Se puede rayar con la navaja.	Muy baja	1 a 5
Se raya difícilmente con la navaja.	Baja	5 a 25
No puede rayarse con la navaja. Se puede romper con un golpe de martillo.	Media	25 a 50
Se requieren varios golpes de martillo para romperla.	Alta	50 a 100
Difícil de romper con el martillo de geólogo.	Muy alta	100 a 250
Con el martillo de geólogo sólo se pueden producir algunas esquirlas.	Extremadamente alta	> 250

2.2.9.7 Grado de alteración

La roca normalmente se altera como consecuencia natural de los procesos continuados de origen físico-químico. En función del grado de avance de ese proceso, la comunidad técnica ha convenido en clasificar la alteración de las rocas de acuerdo con la nomenclatura que se indica en la Tabla 2.2.2.

Tabla 2.2.2. Escala de la meteorización de las rocas (ISRM)

Grado	Denominación	Criterio de reconocimiento
I	Roca sana	La roca no presenta signos visibles de meteorización, pueden existir ligeras pérdidas de color o pequeñas manchas de óxidos en los planos de discontinuidad.
II	Roca ligeramente meteorizada	La roca y los planos de discontinuidad presentan signos de decoloración. Toda la roca ha podido perder su color original debido a la meteorización y superficialmente ser más débil que la roca sana.
III	Roca moderadamente meteorizada	Menos de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma continua o en zonas aisladas.
IV	Roca muy meteorizada	Más de la mitad del material está descompuesto a suelo. Aparece roca sana o ligeramente meteorizada de forma discontinua.
V	Roca completamente meteorizada	Todo el material está descompuesto a un suelo. La estructura original de la roca se mantiene intacta.
VI	Suelo residual	La roca está totalmente descompuesta en un suelo y no puede reconocerse ni la textura ni la estructura original. El material permanece "in situ" y existe un cambio de volumen importante.

Nota: En la Tabla 4.9.2 se indican algunas apreciaciones adicionales de los grados de meteorización (Apartado 4.9. Dragados y rellenos)

2.2.10 Deformabilidad del terreno

2.2.10.1 El modelo elástico

La deformabilidad del terreno puede caracterizarse, en buen número de ocasiones, por unas constantes elásticas equivalentes.

E = módulo de elasticidad.

ν = módulo de Poisson.

Tales constantes son de aplicación cuando las tensiones con las que se calcula son tensiones efectivas.

Cuando no es posible conocer las presiones efectivas se pueden definir unos parámetros elásticos aparentes y utilizarlos en cálculos con las presiones totales.

E_{ap} = módulo de elasticidad aparente para cálculos de deformación usando tensiones totales.
 ν_{ap} = módulo de Poisson aparente para esos cálculos.

Es relativamente frecuente estudiar problemas “sin drenaje” en suelos saturados donde el agua se supone que es incompresible y que no puede moverse y por lo tanto el suelo no puede cambiar de volumen. Los sólidos elásticos que no cambian de volumen tienen un módulo de Poisson igual a 0,5 y por eso, en ese tipo de cálculos, es frecuente suponer:

$\nu_{ap} = 0,5$ cálculos de deformación “sin drenaje” en terrenos saturados utilizando presiones totales.

El módulo de deformación transversal “G”, que resulta de dividir las tensiones de corte entre las deformaciones angulares que producen, es, según la teoría de la elasticidad:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Este módulo es, teóricamente, independiente de que se establezca en términos de presiones totales o en término de presiones efectivas. Por ese motivo para los cálculos “sin drenaje” se puede suponer, a falta de mejor información, que:

$$E_{ap} = \frac{1,5}{(1 + \nu)} \cdot E$$

donde E y ν son los parámetros elásticos del esqueleto del suelo.

En el caso de rocas el tratamiento es similar aunque la última hipótesis mencionada relativa a la incompresibilidad del agua es más dudosa y su aplicación no es siempre recomendable.

2.2.10.2 El modelo edométrico

La compresibilidad de suelos arcillosos sometidos a cargas menores que las que el terreno tuvo en el pasado es claramente diferente de la que corresponde a cargas mayores. Por eso se suele caracterizar la deformabilidad de dos maneras distintas según la carga sea menor o mayor que un valor crítico llamado “presión de preconsolidación”, que es la presión efectiva máxima que el suelo soportó en el pasado.

Los suelos arcillosos que están, en el terreno, sometidos a presiones naturales iguales a la presión de preconsolidación se denominan “normalmente consolidados”. En otro caso se denominan “sobreconsolidados”. Se define como “razón de sobreconsolidación”, OCR, al cociente entre la presión de preconsolidación, p_c , y la presión efectiva actual, p .

En suelos cohesivos blandos se suele caracterizar la deformabilidad en procesos de carga mediante una expresión tipo:

$$\Delta e = C_s \cdot \log_{10} \frac{p_2}{p_1} \quad (\text{Si } p_2 < p_c)$$

$$\Delta e = C_s \cdot \log_{10} \frac{p_c}{p_1} + C_c \cdot \log_{10} \frac{p_2}{p_c} \quad (\text{Si } p_2 > p_c)$$

donde:

Δe = reducción del índice de poros ante un incremento de presión de p_1 a p_2 .
 C_c = índice de compresión (adimensional).

- C_s = índice de entumecimiento (adimensional).
 p_c = presión de preconsolidación.

En procesos de descarga el aumento del índice de poros al disminuir la presión de p_2 a p_3 sería:

$$\Delta e = C_s \cdot \log_{10} \frac{p_2}{p_3}$$

Los tres parámetros que definen la deformabilidad (C_c , C_s y p_c) se obtienen de ensayos edométricos y son de aplicación a problemas en los que el proceso de carga sea similar al del ensayo, esto es, coartando la deformación del terreno en cualquier dirección perpendicular a la carga.

Se define como módulo edométrico, E_m , al valor siguiente:

$$E_m = \frac{\Delta p}{\Delta e} \cdot (1 + e_o)$$

donde:

- Δp = variación del valor absoluto de la presión efectiva.
 Δe = variación del valor absoluto del índice de poros.
 e_o = índice de poros original del terreno.

Para variaciones muy pequeñas de carga en torno a la presión efectiva "p", existe una relación entre el módulo edométrico y los índices antes indicados:

$$E_m = 2,3 \cdot p \cdot \frac{1 + e_o}{C_c} \quad (\text{Procesos de carga noval})$$

$$E_m = 2,3 \cdot p \cdot \frac{1 + e_o}{C_s} \quad (\text{Procesos de recarga o descarga})$$

Las constantes elásticas, E y ν , que producen la misma deformación que el modelo edométrico guardan, con el módulo edométrico, la relación siguiente:

$$E = E_m \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)}$$

En los sedimentos marinos y costeros suelen existir suelos arcillosos o limosos blandos altamente compresibles y que pueden ser causa de grandes asentamientos.

El índice de compresión de estos suelos es, en general, tanto mayor cuanto mayor es su plasticidad. Una relación típica que el ingeniero puede usar como referencia es:

$$C_c = \frac{LL - 10}{100} \geq 0,10$$

donde:

- C_c = índice de compresión de un suelo arcilloso normalmente consolidado.
 LL = límite líquido expresado en %.

El índice de entumecimiento C_s suele ser varias veces menor (del orden de 5 a 10 veces menor) salvo en aquellos suelos de estructura metaestable.

El ingeniero debe estudiar para su caso concreto los valores de C_c y su posible correlación con otros parámetros de identificación (el límite líquido se ha indicado como ejemplo) para poder extender su aplicación a otros suelos similares del entorno.

Se advierte de situaciones teóricamente mal llamadas de subconsolidación (presión efectiva existente inferior a la presión efectiva teórica en el plano considerado suponiendo una consolidación normal), que pueden ocurrir en sedimentos que aún tienen pendiente parte de la consolidación natural debido a su propio peso o a que están en zonas con régimen artesianas del agua intersticial o que están afectados por la generación de gases naturales producto de ciertos procesos de descomposición de materia orgánica. También puede darse esta situación como resultado de una licuefacción parcial causada por las tensiones cíclicas inducidas por el movimiento del agua.

En esas situaciones, las presiones intersticiales son superiores a las hidrostáticas, las presiones efectivas pueden ser muy pequeñas y por lo tanto la compresibilidad mucho mayor.

2.2.10.3 El modelo de Winkler

En otras ocasiones, y para problemas más particulares, la deformación del terreno se representa por “módulos de balasto” o módulos de reacción denominados usualmente con la letra K , que son el cociente entre la presión aplicada, “ p ” y el desplazamiento producido, “ s ”.

$$K = \frac{p}{s}$$

Dado que esta relación depende, para un mismo terreno, de la extensión, intensidad y orientación de la carga (entre otros factores), no debe interpretarse como una cualidad del suelo sino como un parámetro de cálculo aplicable únicamente a problemas de deformación similares a los del ensayo en que fue determinada.

Este parámetro es típico en el estudio de losas de cimentación y en el estudio de la deformación horizontal de pilotes y se obtiene normalmente de ensayos de placa de carga y de ensayos de tiro horizontal en pilotes, entre otros.

2.2.10.4 Otras formas de considerar la deformación del terreno

Existen, dentro de la geotecnia, otras formas de considerar la deformación de los suelos. Como complemento a las ya citadas se quieren mencionar otras dos. Una sencilla que suele utilizarse en el estudio de movimientos de muros y otra, más usual, utilizada en ciertos programas de ordenador.

Es relativamente frecuente, en el estudio de empujes sobre muros, especificar deformaciones límite que provocan los estados extremos de situación activa o pasiva. Estos parámetros de deformación suelen obtenerse de experiencias previas o de ensayos en modelos.

Existen modelos de elasticidad no lineales (modelo hiperbólico, por ejemplo) o de elasto-plasticidad u otros complejos de flujo y deformación acoplados que se usan frecuentemente en cálculos con elementos finitos y que se consideran fuera del alcance de esta ROM.

2.2.11 Otras características

Existen otras muchas características y otros parámetros que se utilizan en geotecnia cuya aplicación práctica puede ser menos frecuente aunque no por ello tengan menor importancia. Entre ellos se quieren citar:

- ◆ Resistencia de pico y residual. En suelos arenosos densos, en arcillas sobreconsolidadas, limos carbonatados, así como otros muchos tipos de suelo, puede ocurrir que la resistencia al corte alcance un máximo para una cierta deformación (resistencia de pico) y después tienda hacia un valor menor (resistencia residual). En el estudio de ciertos problemas geotécnicos será preciso conocer ambos valores de la resistencia.
- ◆ Tixotropía y susceptibilidad tixotrópica. Algunos suelos arcillosos tienen una resistencia al corte mucho mayor en estado natural que después de remoldeados, aunque tal remoldeo se haga conservando la misma densidad y humedad. Al cociente de ambas resistencias se le denomina factor de susceptibilidad tixotrópica o simplemente susceptibilidad de la arcilla y se le denomina s_t .
- ◆ Grado de consolidación. Expresa, en una escala de 1 a 100, el avance del proceso de consolidación, bien en lo referente a la disipación de la presión intersticial en exceso a un determinado nivel (grado de consolidación U_z), o bien en términos del avance del asiento de la superficie (grado de consolidación U).
- ◆ Coeficiente de consolidación. Es frecuente el uso de un parámetro mixto de permeabilidad, k , y deformación, E_m (módulo edométrico) denominado coeficiente de consolidación.

$$c_v = \frac{k \cdot E_m}{\gamma_w}$$

donde γ_w es el peso específico del agua.

Este parámetro se suele expresar en cm^2/s y tiene especial interés en los cálculos de tiempos de consolidación.

- ◆ Coeficientes de presión intersticial. En los ensayos triaxiales se producen variaciones de presión intersticial, Δu , cuando no se permite el drenaje y se modifican las presiones de confinamiento " σ_3 " y de carga vertical " σ_1 ". Es común el uso de los coeficientes adimensionales A y B de Skempton para estimar la variación de presión intersticial mediante la expresión:

$$\Delta u = B(\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3))$$

- ◆ Expansividad y colapso. Existen suelos que sufren una alteración importante de su estructura cuando son saturados y en consecuencia pueden hinchar o colapsar (en algunos se han observado ambos fenómenos predominando uno u otro dependiendo de la carga). La magnitud del hinchamiento y del colapso depende de varios factores, entre otros, de la presión efectiva. En ese sentido es frecuente el uso del término "presión de hinchamiento" como aquella presión efectiva que evita la expansión durante la saturación e "hinchamiento libre" al cambio porcentual de volumen que ocurre al saturar el suelo con presiones efectivas bajas (del orden de 1 kN/m^2). El colapso se suele medir mediante el parámetro " γ_c " o deformación unitaria vertical provocada por la saturación. Ese parámetro depende, entre otros factores, de las presiones aplicadas en el momento de la saturación.

2.3 OBJETIVOS Y FASES DEL RECONOCIMIENTO DEL TERRENO

La realización de cualquier estudio o proyecto de obra marítima o portuaria, deberá ir precedida de una Investigación Geotécnica específica, adaptada a las condiciones de cada caso concreto.

Todos los estudios, reconocimientos de campo, ensayos de laboratorio, análisis de la información, etc. deberán quedar recogidos en un único documento, que constituirá el Informe Geotécnico que ha de servir de base a los trabajos posteriores.

El alcance del Informe Geotécnico vendrá condicionado por la finalidad del trabajo en el que va a ser utilizado, pudiendo establecerse la siguiente clasificación:

a. Elección de emplazamiento

Valoración comparativa de diversos emplazamientos considerados viables o selección de las zonas más adecuadas dentro de un mismo emplazamiento.

b. Viabilidad

Obtención de la información necesaria para verificar si las condiciones de un emplazamiento son adecuadas a las obras previstas en el mismo.

c. Proyecto

Establecimiento de las condiciones del terreno (estratigrafía, parámetros geotécnicos, niveles piezométricos, etc.) que permitan una definición precisa de las obras, incluyendo aquéllas que tengan un carácter temporal.

d. Construcción

Estudio complementario de aspectos específicos que permitan adoptar los procedimientos constructivos más adecuados, prever los problemas que pueden aparecer durante la construcción como consecuencia de las características geotécnicas del terreno, estudio de posibles procedencias alternativas de materiales, elección de las zonas para instalaciones o acopios, etc.

e. Impacto de las obras

Estudio de las modificaciones que pueden aparecer en el terreno, bien de modo natural o como consecuencia de las propias obras, y que pueden afectar tanto a estas nuevas obras como a otras preexistentes o futuras y, de modo general, al área circundante a la zona objeto de estudio.

f. Otros objetivos

Tales como estudios de las condiciones de seguridad de estructuras preexistentes, investigación de incidentes, etc.

La finalidad del Informe Geotécnico debe figurar de modo explícito en su texto haciendo mención del tipo de obras o estructuras para las que se ha previsto que sea utilizada la información. Su utilización posterior para una finalidad distinta deberá ser justificada de modo expreso.

La extensión y la profundidad de una investigación geotécnica para una obra marítima y portuaria vendrán condicionadas por el carácter de los trabajos y obras a desarrollar en el emplazamiento y por las características geotécnicas del terreno. Considerando dichos condicionantes, el técnico responsable de la investigación geotécnica establecerá el programa detallado de la misma, con la previsión de las adaptaciones necesarias a la vista de los resultados que el avance de la propia investigación vaya proporcionando.

La investigación se desarrollará en sucesivas etapas que, en general, pueden resumirse del modo siguiente:

a. Estudio Preliminar

Comprende los trabajos previos de recopilación y análisis de la información preexistente. En general, esta fase será desarrollada en oficina, si bien incluirá visitas de inspección al emplazamiento con toma de datos, realización de trabajos sencillos de reconocimiento (p.ej.: calicatas, cartografía de materiales superficiales, etc.) así como los sondeos previos necesarios para conocer la estructura básica del terreno si ésta no fuera conocida. Esta etapa concluye con la redacción del Informe Geotécnico Preliminar.

b. Reconocimiento

Incluye esta etapa todos los trabajos de reconocimiento de campo posteriores al estudio preliminar, así como los ensayos de laboratorio correspondientes.

c. Informe Geotécnico

El informe debe incluir un resumen de la información previa, la descripción y análisis de los reconocimientos realizados, la identificación de los materiales que existen en el subsuelo y la determinación de los parámetros geotécnicos necesarios para los trabajos que hayan sido objeto del estudio.

En determinados casos, la existencia de problemas singulares puede exigir la realización de una investigación o redacción de un estudio, específicos, cuyas características serán adaptadas al tema a tratar.

Comentario: Las fases que se establecen en esta Recomendación para el desarrollo de la investigación geotécnica tienen el carácter de una metodología básica que garantice la obtención de la información requerida para la realización de los trabajos posteriores (estudios de viabilidad, proyecto de construcción, etc). La intensidad y duración de estas fases deberá adaptarse a las circunstancias específicas de cada caso.

Siempre que el plazo general del trabajo lo permita, las tres fases indicadas se desarrollarán de modo sucesivo. Un adecuado Estudio Preliminar, con una exhaustiva recopilación e interpretación de la documentación existente, permite una programación adecuada de los reconocimientos, con el consiguiente ahorro de coste y optimización de la información que puede obtenerse con los mismos.

En cualquier caso, existe la posibilidad de solapar las diversas fases (iniciar los reconocimientos de tipo más general antes de finalizar el Estudio Preliminar, redacción de avances del Informe Geotécnico antes de haber finalizado totalmente los reconocimientos), con objeto de adaptar la investigación geotécnica a los plazos y necesidades del trabajo general a que va destinada.

El contenido de cualquier avance del Informe Geotécnico deberá quedar integrado en la edición final de dicho Informe, de manera que éste quede completo y sirva como referencia única en el desarrollo del trabajo al que se destina.

2.4 ESTUDIO PRELIMINAR

El Estudio Preliminar deberá cubrir tres aspectos fundamentales:

- I) Recopilación y análisis de la información preexistente.
- II) Determinación preliminar de la estratigrafía y características geotécnicas de los materiales, así como de cualquier otro condicionante, de modo que pueda iniciarse el desarrollo de los primeros aspectos del trabajo a que se destina la Investigación: estudio de soluciones, comparación de alternativas, predimensionamiento, etc.
- III) Establecimiento y programación de los reconocimientos (trabajos de campo y ensayos de laboratorio) que se consideran necesarios para completar la Investigación Geotécnica.

2.4.1 Información preexistente

Las posibles fuentes de información preexistente pueden agruparse del modo siguiente:

a. Información publicada

- ◆ Normativa aplicable.

- ◆ Documentación geológica y geotécnica de carácter general, publicada por el Instituto Tecnológico y Geominero de España (ITGE). En particular, se recomienda la consulta de:
 - Mapa Geológico E: 1/200.000.
 - Mapa Geológico E: 1/50.000.
 - Mapa Geotécnico E: 1/200.000.
 - Mapa de rocas industriales E: 1/200.000.
- ◆ Atlas geotécnicos que existen en algunos puertos.
- ◆ Fotografías aéreas, donde sea aplicable.
- ◆ Cartas marinas.
- ◆ Mapas antiguos (en el caso que puedan localizarse).
- ◆ Estudios y/o artículos publicados relativos a proyectos y obras en la zona próxima a la que es objeto de la Investigación Geotécnica.

b. Información no publicada

- ◆ Investigación sobre la experiencia local en relación con aspectos geotécnicos.
- ◆ Reconocimientos y estudios geotécnicos correspondientes a proyectos y obras próximas.
- ◆ Información sobre la utilización pasada y presente del suelo (al objeto de localizar posibles cimentaciones u obras enterradas, zonas de dragado o relleno, etc).
- ◆ Fuentes de suministro de materiales de construcción.
- ◆ Información diversa que pueda condicionar desde un punto de vista geotécnico: estructuras existentes, industrias y propiedades próximas que pueden verse afectadas, excavaciones anteriormente realizadas, construcciones antiguas, etc.

c. Inspección del emplazamiento y reconocimiento previo

Toda esta información debe complementarse con:

- ◆ Visitas de inspección al emplazamiento.
- ◆ Confirmación de la cartografía geológico-geotécnica y su adaptación a una escala que proporcione el detalle suficiente para los sucesivos trabajos.
- ◆ Realización de algunos reconocimientos sencillos (calicatas, toma de muestras con “vibrocorer”, penetrómetros, geofísica, ensayos de identificación, etc.) y de los sondeos necesarios para conocer la estructura básica del subsuelo, si ésta no fuese conocida.
- ◆ Contraste general de la restante documentación obtenida.

2.4.2 Informe geotécnico preliminar

A partir de esta información se redactará el Informe Geotécnico Preliminar donde se describirán las condiciones geológicas y geotécnicas del área estudiada, con la precisión suficiente para permitir el desarrollo de los trabajos y cálculos previos, en tanto se dispone de la información completa. Esta definición debería incluir, siempre que sea posible, los siguientes puntos:

- ◆ Marco geológico y evolución de la geomorfología del emplazamiento.
- ◆ Perfiles geotécnicos y/o columnas-tipo del terreno.
- ◆ Identificación de los materiales. Al objeto de establecer un criterio uniforme en los símbolos gráficos empleados para designar los materiales, en la Tabla 2.4.1 se indica la simbología.

Esta identificación deberá ir completada por aquellas observaciones que puedan resultar de interés para una mejor comprensión de la estructura del terreno: edad geológica, origen de los materiales (aluvial, piedemonte, coluvión, formación eólica, etc.), coloración, etc.

Tabla 2.4.1. Símbolos y términos comunes para la descripción preliminar del terreno

Tipo de roca	Símbolo	Tipo de roca	Símbolo
ROCAS SEDIMENTARIAS		ROCAS SEDIMENTARIAS	
Conglomerados		Dolomías	
Areniscas		Yesos	
Limolitas		ROCAS METAMÓRFICAS	
Argilitas		Pizarras	
Margas		Esquistos	
Calizas		Gneises	
Calizas-margosas		ROCAS PLUTÓNICAS	
Calcarenitas			
		ROCAS VOLCÁNICAS	
Tipo de suelo	Símbolo	Tipo de suelo	Símbolo
SUELOS GRANULARES		SUELOS ORGÁNICOS Y RELLENOS	
Gravas		Suelo vegetal	
Arenas		Fangos y turbas	
SUELOS COHESIVOS		RELLENOS ARTIFICIALES	
Limos		Vertidos no controlados	
Arcillas		Banquetas de todo-uno	
		Escolleras	

- ◆ Asignación de las características básicas (densidad, resistencia al corte, módulos de deformación y permeabilidad) que pueden emplearse en las estimaciones previas. A modo de referencia y cuando no se disponga de algún tipo de datos concretos de la zona, se emplearán los valores medios aproximados indicados en el apartado 2.4.3.

- ◆ Posición de nivel piezométrico.
- ◆ Cualquier otro aspecto singular que pueda condicionar el proyecto, desde el punto de vista geotécnico.

El Informe Geotécnico Preliminar, basado en la información previa, debe concluir con la identificación de los aspectos importantes que son desconocidos y que han de ser objeto de nuevos reconocimientos. A tal fin se debe disponer de una descripción lo más exacta posible de las obras a realizar. La experiencia indica que cuanto más detallado esté el proyecto a la hora de programar los reconocimientos, más efectivos serán éstos y menor será la necesidad de reconocimientos geotécnicos complementarios posteriores.

Vistos los aspectos geotécnicos que requieren investigación, confirmación o mayor detalle, se procederá a programar los trabajos del reconocimiento geotécnico. A esa programación debe dedicársele especial atención pues, de otra forma, puede resultar una información exhaustiva en algunos aspectos mientras que en otros deje lagunas importantes.

Es posible que no sea necesario realizar más reconocimientos geotécnicos, aparte de los realizados en el contexto del Estudio Preliminar. Así ocurre en obras de menor importancia a realizar en emplazamientos con buen terreno y donde la información geotécnica previa es abundante y haya sido contrastada. En ese caso, si así lo identifica y justifica debidamente el técnico responsable, se concluirá el Informe Geotécnico Preliminar, del que se eliminará el calificativo de “preliminar” pasando a ser el Informe Geotécnico.

Comentario: La situación más frecuente, ante un proyecto de cierta importancia económica o que entrañe riesgo de daños a las personas o a sus propiedades o que haya de construirse sobre terrenos de peor calidad o de condiciones heterogéneas o del que exista poca información previa, será que el informe geotécnico preliminar concluya con la identificación de problemas que requieren mayor análisis y que sea preciso ampliar la información geotécnica. En estos casos el Informe Geotécnico Preliminar concluirá con la identificación de las necesidades de información adicional.

Teniendo en cuenta el conocimiento previo de las obras a realizar y la naturaleza del terreno, se deben identificar claramente todos los posibles problemas geotécnicos a analizar y definir, para cada uno de ellos, qué variables geométricas y qué parámetros geotécnicos son de interés para poder analizarlos correctamente. Además, en cada uno de los problemas previstos, se evaluará la necesidad de precisión de los datos requeridos para el posterior análisis. En función de esa precisión necesaria los reconocimientos geotécnicos serán de mayor o menor intensidad.

El Informe Geotécnico Preliminar tiene una gran transcendencia y a él se le deben dedicar los mayores esfuerzos, de otra forma los reconocimientos geotécnicos posteriores serían hechos a ciegas, con un pronóstico vago de lo que se espera encontrar. Nunca debe hacerse un reconocimiento geotécnico sin tener una idea aproximada de sus resultados.

2.4.3 Parámetros geotécnicos preliminares

Cualquier dato del terreno que pueda resultar crítico en un proyecto debe determinarse expresamente. Al contrario, algunos parámetros geotécnicos cuya repercusión en el proyecto sea secundaria puede definirse de forma aproximada en función de experiencia contrastada.

Los valores de los parámetros geotécnicos que se incluyen en este apartado son sólo ilustrativos. El valor real puede quedar incluso fuera del amplio rango de valores que se indica.

En la Tabla 2.4.2 se indican valores medios aproximados de los pesos específicos, resistencia a compresión simple y parámetros del modelo elástico de distintas rocas sanas.

En la Tabla 2.4.3, de modo similar, se indican valores medios típicos de distintas formaciones de suelos y rellenos.

Tabla 2.4.2. Algunas características elementales de las rocas sanas* que pueden utilizarse para estimaciones

	Rocas	Peso Específico (kN/m ³)	Resistencia a Compresión Simple de los Fragmentos Sanos (MPa)	Módulo de Deformación (MPa)	
Duras	ÍGNEAS METAMÓRFICAS Gneis, Cuarzitas SEDIMENTARIAS Areniscas bien cementadas, algunas calizas y dolomías más compactas	26	100	MASIVAS	50.000
				DIACLASADAS	20.000
				MUY DIAKLASADAS	10.000
Medias	METAMÓRFICAS Esquistos y pizarras SEDIMENTARIAS Excepto margas, areniscas, y conglomerados poco cementados	24	50	MASIVAS	20.000
				DIACLASADAS	10.000
				MUY DIAKLASADAS	5.000
Blandas	SEDIMENTARIAS Excepto margas, areniscas, y conglomerados poco cementados	22	20	MASIVAS	5.000
				DIACLASADAS	2.000
				MUY DIAKLASADAS	1.000

Peso específico: El dato indicado puede variar ± 2 kN/m³ o incluso más en algunas rocas, particularmente si existen minerales pesados (piritas, por ejemplo).

Resistencia: Este dato puede oscilar entre menos de la mitad y más del doble del indicado.

Módulo de deformación: Se refiere al módulo de deformación equivalente del macizo cuando se cargan áreas de dimensiones superiores al metro cuadrado. El valor del módulo puede variar entre amplios límites; pueden darse valores tres veces mayores o menores que los indicados. El módulo de Poisson puede suponerse igual a 0,2 para las rocas más duras, 0,25 para las medias y 0,3 para las blandas.

(*) Una alteración moderada de la roca puede reducir los módulos de deformación un orden de magnitud. Una alteración fuerte hace que el macizo rocoso se comporte como el suelo producto de la alteración.

Tabla 2.4.3. Algunas características elementales de los suelos que pueden utilizarse para estimaciones previas

	Tipo de suelos	Compacidad	Índice de poros ⁽²⁾	Cohesión (kPa)	Ángulo de Rozamiento (ϕ^0)	Módulo de deformación ⁽⁵⁾ drenado (MPa)	Coefficiente de permeabilidad ⁽³⁾ (cm/s)
Suelos granulares ⁽¹⁾	Gravas y arenas limpias (arenas > 10%)	Densa	0,25	0	45	100	10 ⁻²
		Media	0,35	0	40	50	
		Floja	0,45	0	35	20	
		Muy floja	0,60	0	30	10	
	Gravas y arenas con algo de limos y/o arcillas (5-10%) ⁽⁴⁾	Densa	0,20	10	40	50	10 ⁻³
		Media	0,30	5	35	20	
		Floja	0,40	2	30	10	
		Muy floja	0,60	0	27	5	
	Gravas y arenas con gran contenido en suelos finos (5-10%) ⁽⁴⁾	Densa	0,15	20	35	50	10 ⁻⁴
		Media	0,25	10	30	20	
		Floja	0,35	5	27	10	
		Muy floja	0,50	0	25	5	
Rellenos artificiales	Banquetas de todo-uno vertidas y escolleras de granulometría continua (sucias)	Floja	0,50	0	40	10	I
		Muy floja	0,70	0	35	5	

Tabla 2.4.3. Algunas características elementales de los suelos que pueden utilizarse para estimaciones previas (Continuación)

	Tipo de suelos	Consistencia	Índice de poros ⁽²⁾	Resis. al corte sin drenaje ⁽⁶⁾ (kPa)	Resistencia con drenaje C(kPa) (ϕ^0)		Módulo de deformación ⁽⁵⁾ drenado (MPa)	Coefficiente de permeabilidad ⁽³⁾ (cm/s)
Suelos cohesivos	Limos de granulometría uniforme con algo de arena y arcilla	Dura o firme	0,40	100	50	30	40	10 ⁻⁶
		Media	0,60	60	20	25	15	
		Blanda	0,80	20	10	20	7	
		Muy blanda	1	10	0	18	2	
	Arcilla y limos arcillosos. Pueden contener gravas y/o arenas en proporciones menores del 70%	Dura o firme	0,35	>100	50	28	50	10 ⁻⁸
		Media	0,50	80	20	23	20	
		Blanda	0,70	40	10	19	5	
		Muy blanda	1	20	0	15	1	

Los suelos con contenidos apreciables de materia orgánica tienen características mecánicas mucho más pobres que las indicadas en esta tabla.

- (1) Los suelos calcáreos, particularmente los conchíferos o coralinos, pueden tener ángulos de rozamiento claramente más bajos, en particular para presiones altas (cargas de hundimiento por punta de pilotes).
- (2) Para calcular pesos específicos puede utilizarse un peso específico relativo de las partículas igual a 2,7.
- (3) Los coeficientes de permeabilidad indicados son únicamente un valor típico. Suelos que obedecen a una misma descripción preliminar pueden tener permeabilidades dos e incluso tres ordenes de magnitud diferentes a los indicados.
- (4) El contenido en finos se refiere al porcentaje que pasa por el tamiz 0,008 UNE.
- (5) El módulo de Poisson puede tomarse entre 0,30 para los suelos densos y 0,40 para los más flojos o blandos.
- (6) La resistencia al corte sin drenaje de suelos arcillosos normalmente consolidados depende de la presión vertical efectiva. Ver 2.2.8.3.

2.5 PROGRAMACIÓN DE LOS RECONOCIMIENTOS

Dada la muy diversa problemática que puede derivarse tanto de las características previstas inicialmente para la propia obra como de las condiciones geotécnicas del terreno, no resulta viable establecer unas recomendaciones de detalle para cada una de las distintas situaciones que podrían llegar a plantearse.

Partiendo de la identificación de necesidades que ha de figurar expresamente en el Informe Geotécnico Preliminar, se debe estudiar el modo de satisfacerlas de la forma más adecuada teniendo presente las distintas técnicas de reconocimiento disponibles.

Independientemente de la colaboración que puedan prestar los técnicos especialistas, la elección del método de reconocimiento más adecuado en cada caso, la posición de los puntos en los que efectuar los trabajos de campo, profundidad a alcanzar con los reconocimientos, ensayos de muestras, ensayos especiales, etc., será competencia de los técnicos responsables del trabajo al que está destinado el reconocimiento.

Se recomienda que la programación de los reconocimientos quede recogida en un documento en el cual, además de la definición de los mismos, se describan los objetivos concretos perseguidos con cada uno de los trabajos a realizar, la previsión de posibles modificaciones en la campaña (variaciones en la profundidad, reconocimientos complementarios, etc.), en función de los resultados que se obtengan y cualquier otra información o criterio que permita realizar, durante la fase de reconocimientos, las adaptaciones necesarias para asegurar que se obtienen los datos requeridos.

Una vez decididos los trabajos de reconocimiento geotécnico necesarios se procederá a editar el documento correspondiente que servirá de base para su realización. Tal documento tendrá la estructura básica de los proyectos de ingeniería civil. Esto es, tendrá una memoria donde se justifique el reconocimiento geotécnico decidido en función de la necesidad de información adicional puesta de manifiesto en el Informe Geotécnico Preliminar, al que se hará referencia. Tendrá unos planos que permitan el correcto replanteo de los reconocimientos. Tendrá un pliego de prescripciones particulares donde se especifiquen los detalles de los reconocimientos y finalmente contendrá una estimación presupuestaria.

En los siguientes apartados se desarrollan las recomendaciones básicas a tener en consideración en el momento de programar y seleccionar las distintas técnicas de reconocimiento.

2.6 RECONOCIMIENTOS GEOFÍSICOS

Los métodos geofísicos tienen su campo de aplicación más idóneo cuando es necesario investigar, de un modo rápido y económico, áreas extensas o alineaciones de gran longitud.

Los trabajos de campo e interpretación de las medidas deben ser efectuados por personal muy cualificado, previo estudio detallado de la información del terreno que se haya podido obtener por otros procedimientos.

En todo caso, los reconocimientos geofísicos deberán ser complementados con la realización de sondeos mecánicos que permitan confirmar, en puntos estratégicamente dispuestos, la estratigrafía y características del terreno deducidas de la interpretación de la geofísica.

Tabla 2.6.1. Resumen de algunos métodos geofísicos utilizados en reconocimientos geotécnicos

Nombre	Parámetros que se obtienen	Aplicación	Limitaciones
SÍSMICA DE REFRACCIÓN Determinación de tiempos de llegada de ondas generadas por impactos o pequeñas detonaciones a puntos situados a distintas distancias.	Curvas distancia-tiempos de llegada (dromocrónicas).	<ul style="list-style-type: none"> Determinación aproximada de fondos rocosos en depósitos de suelos. Determinación de la potencia de alteración en macizos rocosos. Estimación de propiedades del terreno en función de las velocidades de propagación. 	Posibles áreas de sombra provocadas por estratos flojos. Profundidades máximas de reconocimiento del orden de 20 m.
PROPAGACIÓN DE ONDAS EN SONDEOS Cross-Hole, entre dos sondeos próximos. Down-Hole y Up-Hole, a lo largo de un sondeo. Tomografía sísmica Varios sondeos y señales múltiples	Velocidades de propagación de ondas de compresión y de corte	<ul style="list-style-type: none"> Estudios de deformabilidad dinámica del terreno 	Posibles interferencias entre estratos difíciles de interpretar
SÍSMICA DE REFLEXIÓN Registro de eco reflejado por el terreno a ondas de presión generadas en superficie.	Imagen de la estructura geológica del terreno	<ul style="list-style-type: none"> Determinación aproximada de fondos rocosos. Generalmente se aplica para explorar profundidades superiores a 500 m. 	Las ondas reflejadas y refractadas pueden interferir y complicar la interpretación
SONAR Registro de los tiempos de llegada de las ondas sonoras provocadas en el agua y reflejadas en el fondo y en el sustrato rocoso.	Tiempos de llegada de los ecos.	<ul style="list-style-type: none"> Determinación de calados y espesores de suelos blandos sobre fondos rocosos. 	Determinación previa de la velocidad de propagación de las ondas en el suelo que recubre el fondo rocoso.
GEOFÍSICA ELÉCTRICA Medición de la intensidad de la corriente y la caída de potencial entre distintos puntos del terreno inducida mediante unos electrodos.	Intensidades de corriente y diferencias de potencial para distintas configuraciones del sistema.	<ul style="list-style-type: none"> Estimación del tipo de terreno en función de las resistividades calculadas al interpretar los datos. Aplicación hasta profundidades de unos 20 m. 	Escasa correlación entre la resistividad y el comportamiento mecánico del terreno.
GRAVIMETRÍA Medición precisa de la aceleración de la gravedad en distintos puntos.	Variaciones de la aceleración de la gravedad.	<ul style="list-style-type: none"> Detección de grandes variaciones de densidad (huecos, fallas, domos salinos). 	Poco precisa para trabajos geotécnicos.

Los reconocimientos geofísicos pueden utilizarse como herramienta para interpolar información entre puntos reconocidos detalladamente mediante sondeos mecánicos. En ese sentido es conveniente realizar los reconocimientos geofísicos siguiendo las alineaciones utilizadas para implantar los sondeos.

En la Tabla 2.6.I se enumeran los métodos de investigación geofísica más habituales, junto con una sucinta descripción de los mismos y algunas observaciones relativas a su aplicación.

Existen técnicas basadas en la propagación de ondas de deformación de la superficie del terreno o de la medida de la dispersión (variación de la velocidad de propagación con la frecuencia) de utilidad particular en otros fines más concretos (particularmente estudios de pavimentos o estudios de dinámica de suelos) que los reconocimientos geotécnicos en obras marítimas de carácter general.

Existen técnicas de emisión y recepción de ondas electromagnéticas (Georadar) de utilidad variada y escasa aplicación práctica actual.

2.7 SONDEOS MECÁNICOS

El reconocimiento geotécnico mediante sondeos es, en términos generales, el método más directo para conocer el terreno en profundidad, ya que permite la recuperación de testigos, la toma de muestras para ensayos de laboratorio, la realización de ensayos “in situ” y la instalación de equipos de observación tales como piezómetros, inclinómetros, tubos de asiento, etc...

2.7.1 Ejecución de sondeos

La ejecución de sondeos de reconocimiento en zonas marítimas y portuarias exige, en general, la utilización de medios de soporte específicos. Pueden ser plataformas fijas o flotantes debidamente ancladas. En zonas poco abrigadas se necesitan embarcaciones especialmente equipadas para impedir que los movimientos del mar incidan negativamente en las perforaciones.

Los sondeos deben realizarse en puntos seleccionados donde mayor interés tenga la información que se puede conseguir y, además, aprovechar su ejecución para obtener de ellos el mayor número de datos posible. Atendiendo a este último aspecto se recomienda especificar, para la realización de sondeos, la obtención de la información mínima siguiente:

- ◆ Fechas de realización y datos de identificación del sondeo y del sondista que lo realizó.
- ◆ Coordenadas y cota de boca. Es imprescindible el replanteo preciso de la boca de los sondeos y especialmente su cota.
- ◆ Parte del sondeo donde figuren el equipo empleado, el procedimiento y los ritmos de avance, las profundidades donde se han tomado muestras o realizado ensayos, los tramos entubados y tipo y tamaño de la entubación, así como cualquier incidencia de interés, tales como la pérdida del caudal de agua de perforación, niveles de agua, caídas o desprendimientos de la pared del sondeo, etc. A estos efectos se indica que existen equipos de sondeo con registro automático de algunos de estos parámetros, cuya utilización es recomendable.
- ◆ Caja portatestigos suficientemente robusta y debidamente ilustrada donde, además de identificarse el sondeo correspondiente, se marquen con números claramente visibles las profundidades inicial y final del testigo de cada maniobra.
- ◆ Fotografías a color de las cajas de testigos hechas de frente de manera que se aprecien bien los detalles del terreno de caja en caja. En ocasiones puede ser conveniente la realización de fotografías de detalle de ciertos testigos aislados.

- ◆ Columna litológica, realizada por un titulado superior experto en geotecnia en la que, con ayuda gráfica, se recoja la descripción del terreno en cada nivel, los parámetros de avance del sondeo, la ubicación de muestras y ensayos, la situación del nivel freático en el sondeo y el porcentaje de testigo recuperado ⁽¹⁾. Dependiendo del tipo de terreno y de reconocimiento realizado, podrá especificarse el incluir en estas columnas litológicas otros detalles de interés particular.

En la Tabla 2.7.1 se resumen algunas formas comunes de ejecutar sondeos mecánicos, junto con una breve descripción de las mismas y comentarios relativos a su empleo.

Tabla 2.7.1. Algunas formas de realizar sondeos mecánicos

Tipo	Descripción	Campo de aplicación
SONDA HELICOIDAL	Hinca continua por rotación de una hélice.	Suelos de consistencia blanda y media. No permite tomar muestras inalteradas salvo en aquellos casos en que el eje de la hélice es hueco.
HINCA DE TUBOS	Avance de una tubería hincada por percusión o por vibración y extracción de detritus con una pequeña cuchara.	Suelos de consistencia blanda y media. Permite ejecución de ensayos en el sondeo y toma de muestras inalteradas.
ROTACIÓN CON CORONA CIEGA	Avance a rotación o rotopercusión con martillo en cabeza o en fondo.	Suelos duros y rocas. No permite la toma de muestras. Se puede utilizar para avanzar la perforación entre dos puntos donde interesa tomar muestras con otro procedimiento.
ROTACIÓN CON BATERÍA PORTATESTIGOS	Avance a rotación con corona hueca.	Suelos firmes y rocas. Permite tomar muestras y recuperación continua del testigo de la perforación.

NOTAS: El diámetro exterior mínimo usual de los sondeos mecánicos es de 76 mm (3"), de manera que en su interior se puedan realizar ensayos SPT, cuya cuchara tiene un diámetro de 51 mm (2").

En los casos en que las paredes del sondeo resulten inestables se debe disponer un revestimiento y perforar con diámetros ligeramente mayores aunque decrecientes en profundidad (revestimiento telescópico).

La ejecución de sondeos en el mar puede hacerse con los equipos trabajando en el fondo, pero normalmente exige disponer de pontonas donde instalar la sonda. En altamar se necesitan embarcaciones especiales que incluyen, además, otros equipos de ensayos "in situ" y un laboratorio de geotecnia donde realizar la campaña de reconocimiento geotécnico completa.

2.7.2 Profundidad de los reconocimientos

Los factores que más influyen en la profundidad conveniente de los sondeos son:

- ◆ Tipo de problema a analizar.
- ◆ Configuración del subsuelo.
- ◆ Intensidad de la carga aplicada.

(1) En el caso de rocas se sugiere la utilización del parámetro RQD (Rock Quality Designation) que mide, para cada metro de avance de la perforación, el porcentaje de la longitud de testigo que resulta en fragmentos de más de 10 cm de longitud individual.

La gran variedad de situaciones que pueden darse hace imposible unas recomendaciones detalladas aplicables a todos los casos, por lo que a continuación se dan unas recomendaciones generales, siempre aplicables, y una serie de recomendaciones específicas para ciertas situaciones típicas.

De modo general, los reconocimientos deben tener una profundidad suficiente para reconocer todos los niveles cuyo comportamiento puede tener una influencia significativa en el comportamiento de la obra, ya sea en relación con la capacidad portante o asientos de cimentaciones y/o rellenos, como respecto a problemas de filtraciones o de estabilidad de taludes de excavación o relleno.

Es frecuente utilizar el criterio de profundizar los sondeos hasta encontrar “roca sana” y, salvo que el propósito del reconocimiento sea precisamente investigar la calidad de la roca (cimentación con pilotes por punta), bastará con penetrar en ella lo suficiente para confirmar su continuidad en los metros superiores.

En el caso de que los sondeos alcancen el sustrato rocoso, deberán penetrar en el mismo un mínimo de 2 m en roca sana en aquellos casos en los que, a través de información previa, es conocida la naturaleza de la roca y ésta se encuentra poco alterada.

Si la roca presenta un grado de alteración importante o no existe información previa precisa sobre su naturaleza o aparecen niveles cementados (areniscosos, conglomeráticos, etc) intercalados con otros con un bajo grado de cementación, los sondeos deberán penetrar en el sustrato al menos 6 m en roca.

I. CIMENTACIONES SUPERFICIALES

La profundidad de reconocimiento necesaria para estudiar una cimentación superficial debe determinarse por vía doble según se indica a continuación.

Por un lado, los sondeos deben profundizar por debajo de la zona del terreno que puede estar involucrado en el hundimiento potencial de la cimentación. Para cubrir este aspecto se recomienda que la profundidad de prospección “z” bajo el nivel de cimentación sea como mínimo:

$$z_{\min} = 1,5 B$$

donde “B” es la dimensión transversal de la cimentación a utilizar en el estudio de la carga de hundimiento.

Para cimentaciones superficiales por losa de gran anchura donde la carga de hundimiento no sea crítica, la profundidad de reconocimiento se fijará por razones de asiento.

Por otro lado, los sondeos deben profundizar lo suficiente como para reconocer el terreno que puede inducir asientos en la cimentación. En este sentido se considera que la profundidad necesaria, en las situaciones normales en las que la deformabilidad del terreno disminuye con la profundidad, es tal que al nivel más profundo reconocido la carga vertical inducida por la cimentación suponga una pequeña fracción, del orden del 10%, de la presión vertical efectiva existente antes de hacer la obra.

Comentario: Ese criterio se cumple para zapatas de pequeñas dimensiones respecto al espesor de suelos compresibles ($B \ll z_{\min}$) cuando la profundidad del reconocimiento “z” bajo el nivel de cimentación es:

$$z_{\min} = 0,8 \text{ m } \sqrt[3]{\frac{N}{N_0}} ; N_0 = 1 \text{ kN}$$

donde N es la carga total sobre la zapata menos las tierras excavadas para su construcción y z_{\min} es la profundidad necesaria de reconocimiento, bajo el nivel de apoyo de la cimentación.

Para cimentaciones alargadas, en las que la relación entre las dimensiones mayor y menor está por encima de 2, se puede utilizar la expresión:

$$z_{\min} = 0,8 \text{ m} \sqrt{\frac{M}{M_0}} ; M_0 = 1 \text{ kN/m}$$

donde M es la carga neta de cimentación por unidad de longitud y z_{\min} la profundidad de reconocimiento necesaria bajo el nivel de cimentación.

Para obras portuarias anejas con cimentaciones mediante losa de grandes dimensiones en planta o para el estudio de asientos de zonas de acopios cuya carga neta expresada sea « p » (peso total menos tierras excavadas), la profundidad de reconocimiento bajo el nivel de apoyo, expresada en metros, que cumple ese criterio, es:

$$z_{\min} = 1 \text{ m} \cdot \frac{p}{p_0} ; p_0 = 1 \text{ kPa}$$

salvo que antes aparezca roca sana o suelo firme cuya compresibilidad pueda ignorarse.

Para áreas cargadas de dimensiones intermedias puede ser necesario un estudio previo de las tensiones inducidas en el terreno para determinar la profundidad z_{\min} .

Cuando el nivel freático esté por debajo de la cimentación, la profundidad mínima de reconocimiento por razón de asientos podrá reducirse multiplicando por el coeficiente reductor:

$$\alpha = 1 - 0,2 \frac{z}{z_{\min}} \leq 0,8 \quad \text{cimentaciones no alargadas}$$

$$\alpha = 1 - 0,3 \frac{z}{z_{\min}} \leq 0,7 \quad \text{cimentaciones alargadas}$$

Siendo z la profundidad del nivel freático bajo el plano de cimentación y z_{\min} el valor antes determinado por razón de asientos.

2. CIMENTACIONES PROFUNDAS

La profundidad de reconocimiento necesaria para estudiar una cimentación profunda ha de estimarse tras considerar tres problemas típicos: el hundimiento individual del pilote, el hundimiento en grupo de varios pilotes y el asiento de la cimentación.

Para cubrir el primer aspecto se recomienda profundizar el reconocimiento hasta 5 veces el diámetro del pilote bajo el nivel previsto de su punta. Esto es, la profundidad de reconocimiento mínima bajo la superficie de los encepados de los pilotes será:

$$z_{\min} = L + 5 \phi$$

Siendo L y ϕ la longitud y el diámetro del pilote.

Para cubrir el aspecto del hundimiento de algún grupo de pilotes se recomiendan las siguientes profundidades mínimas de sondeo bajo el nivel de su encepado.

$$z_{\min} = L + 1,5 B \quad \text{pilotes por punta}$$

$$z_{\min} = \frac{5}{3} L + 1,5 B \quad \text{pilotes por fuste}$$

donde L es la longitud del pilote y B el ancho del grupo.

Para cubrir el aspecto del posible problema de asientos, se utilizarán los criterios mencionados para las cimentaciones superficiales suponiendo que el plano de cimentación equivalente está al nivel de las pun-

tas si los pilotes trabajan fundamentalmente por punta y a 1/3 de su longitud sobre el plano de las puntas, si trabajan fundamentalmente por fuste.

Comentario: En estos casos y para tener en cuenta la diferencia principal entre la cimentación profunda y la cimentación superficial equivalente, las profundidades de reconocimiento correspondientes deducidas de las fórmulas recomendadas para las cimentaciones superficiales por razón de asientos se reducirán multiplicando por el factor:

$$\beta = 1 - 0,2 \frac{L}{z_{\min}} \leq 0,6$$

donde:

L = Longitud del pilotaje a utilizar.

z_{\min} = Profundidad mínima de reconocimiento correspondiente a la cimentación superficial equivalente.

Las profundidades mínimas que se obtengan se entienden contadas desde el nivel de cimentación virtual supuesto.

3. ESTABILIDAD DE TALUDES DE EXCAVACIÓN O RELLENO

Para definir la profundidad de los sondeos encaminados a estudiar problemas de estabilidad de taludes de excavación o relleno será preciso estimar antes la máxima profundidad de los deslizamientos potenciales.

La profundidad de los reconocimientos debe ser tal que se alcance el nivel estimado del deslizamiento más profundo.

4. DRAGADOS

La profundidad mínima en los sondeos destinados al estudio de dragados será al menos del orden de 2 m mayor que el espesor del dragado previsto. En ocasiones puede ser necesario reconocer profundidades mayores. Junto a los bordes del dragado se tendrá en cuenta lo dicho en el apartado anterior.

Estas profundidades de reconocimiento corresponden a situaciones normales de terreno homogéneo y de compacidad creciente de un modo regular con la profundidad.

Si a profundidades menores que las indicadas aparece roca sana se aplicará el criterio de profundidad de sondeo recomendado en el principio de este apartado.

Si a la profundidad indicada del reconocimiento existen zonas blandas de arcillas o limos normalmente consolidados o suelos orgánicos, se profundizará el reconocimiento hasta atravesarlas completamente. Aún en esas ocasiones no se cree necesario profundizar los reconocimientos más allá de tres veces las profundidades mínimas correspondientes a situaciones usuales.

Se recomienda que alguno o algunos de los sondeos de reconocimiento sean claramente más profundos para confirmar la hipótesis que se haga relativa a la estructura general del terreno.

2.8 POZOS, CALICATAS Y ZANJAS

La forma más rápida, directa y económica de reconocer la zona más superficial del terreno en zonas emergidas es la excavación a cielo abierto de zanjas o calicatas. Para profundidades mayores pueden realizarse pozos que, sólo en casos especiales, pueden ofrecer alguna ventaja sobre los sondeos.

Estas excavaciones están especialmente indicadas en la prospección de préstamos de materiales en los que hayan de hacerse ensayos de compactación, ya que tales ensayos requieren muestras voluminosas difíciles de obtener por otros procedimientos.

Es posible tomar muestras inalteradas en el fondo y paredes de estas excavaciones, aunque se recomienda que, en el documento que se redacte para planificar el reconocimiento geotécnico y que ha de servir de guía a estos trabajos, se prohíba expresamente la toma de muestras manual, con personal trabajando a más de un metro de profundidad, salvo que la excavación esté debidamente entibada; los accidentes en este tipo de prospecciones son frecuentes y peligrosos.

Para documentar la ejecución de estas excavaciones se recomienda dibujar un croquis en planta reflejando su situación e indicando sus coordenadas, hacer una descripción de los materiales excavados y de los que aparecen en el fondo de la excavación con la ayuda de dibujos y fotografías adecuados, señalar la situación del nivel freático y anotar la relación de muestras tomadas y ensayos “in situ” que se hayan podido realizar.

2.9 ENSAYOS “IN SITU”

La determinación de las características del terreno mediante ensayos “in situ” ofrece una ventaja clara sobre la determinación de características en laboratorio. El terreno es ensayado, en el primer caso, en condiciones parecidas a las que interesan para los estudios posteriores. Esto no es siempre cierto, ya que existen situaciones (ensayos de préstamos, por ejemplo) en los que la conservación de las condiciones naturales no es de interés. También pueden existir situaciones singulares en las que los ensayos “in situ” se han de realizar en condiciones más lejanas de aquellas de interés que las que se pueden simular en laboratorio.

En términos generales se recomienda determinar el mayor número de parámetros geotécnicos mediante ensayos “in situ”, especialmente los relativos a la resistencia al corte, la compresibilidad y la permeabilidad. Los ensayos de laboratorio permitirán después ampliar esas características a rangos de presiones y ambientes diferentes a los de los ensayos “in situ” y que pudieran ser de interés dentro de los objetivos del reconocimiento.

2.9.1 Ensayo de penetración estándar. SPT

El ensayo de penetración estándar, SPT (Standard Penetration Test), es el más común dentro de los ensayos “in situ”; prácticamente todas las empresas dedicadas a los reconocimientos geotécnicos disponen del equipo necesario para realizarlo y además, en la geotecnia actual, es el mejor ensayo para investigar la compacidad de depósitos de arena en profundidad.

El ensayo se realiza dentro de un sondeo cuyas paredes son estables o están soportadas por un revestimiento adecuado. Una vez alcanzada la profundidad donde ha de realizarse el ensayo y estando el fondo limpio de los detritus del sondeo, se procede a hincar, en el fondo, una tubería hueca con la punta biselada (cuchara SPT) de diámetro exterior igual a 51 mm (2”) y de diámetro interior igual a 35 mm (1 1/8”). La hincada se realiza mediante golpes de maza en la cabeza del varillaje. La maza es de 63,5 kg y se deja caer libremente desde 76 cm de altura sobre la cabeza del varillaje.

Para depósitos de gravas, y para evitar la rotura de la cuchara, se utilizan puntazas ciegas de igual diámetro exterior.

Durante la hincada se cuentan los números de golpes necesarios para avanzar tramos de 15 cm. La hincada se detiene cuando el avance total es de 60 cm.

El número de golpes necesario para avanzar la hincada los 30 cm centrales es el índice N del SPT. Al extraer la cuchara, una vez realizado el ensayo, se puede obtener una muestra, alterada por la hincada, del terreno atravesado.

El ensayo está normalizado (Norma UNE 103800 o Norma ASTM D-1586-67) y su ejecución debe ser cuidadosa, de manera que el resultado pueda ser interpretado en el contexto de la gran experiencia existente. En particular se advierte que pueden ser motivo de error importante, entre otros, los siguientes hechos:

- ◆ Sifonamiento del fondo del sondeo por desequilibrio entre el nivel piezométrico externo y el nivel de agua en el sondeo.
- ◆ Mala limpieza del fondo antes de iniciar el ensayo.
- ◆ Peso de la maza diferente de los 63,5 kg.
- ◆ Defecto en la medida de la altura de caída de la maza.
- ◆ Rozamiento en la caída de la maza (caída no libre).
- ◆ Golpeo excéntrico sobre el varillaje.
- ◆ Mal estado de la cuchara (biseles romos o dañados).
- ◆ Uniones flojas en el varillaje.
- ◆ Sondeo de tamaño excesivo.
- ◆ Revestimiento muy por encima o muy por debajo del nivel de ensayo.
- ◆ Varillaje más pesado del estándar.

El estudio dinámico de la hincada de la cuchara del SPT permite evaluar la energía que se transmite a través del varillaje. Esa energía se puede medir durante la realización de los ensayos con equipos de auscultación especiales (acelerómetros y defórmómetros). En los ensayos SPT realizados con normalidad, esa energía es aproximadamente igual al 60% de la energía potencial teórica de la maza. En ocasiones es posible conocer esa energía (tamaño de equipos) y puede existir información fehaciente relativa al porcentaje de energía transmitida "h". Cuando eso sea así, el valor del índice N (SPT) puede transformarse al valor que correspondería a una hincada normalizada del 60% de energía mediante la ecuación siguiente:

$$N_{60} = N \text{ (SPT)} \cdot \frac{\eta}{60}$$

donde η es la fracción de energía correspondiente expresada en tanto por ciento. A falta de información específica se supondrá $\eta = 60\%$.

Los ensayos SPT permiten determinar parámetros del terreno especialmente indicados para estimar la facilidad de hincada de pilotes y tablestacas.

El índice SPT está relacionado con la compacidad de las arenas. Terzaghi y Peck ⁽²⁾ (1948) propusieron la siguiente relación:

N (SPT)	Compacidad
0-4	Muy floja
5-10	Floja
11-30	Media
31-50	Densa
Más de 50	Muy densa

(2) Soil Mechanics in Engineering Practice. John Wiley & Sons

En ocasiones interesa concretar con números el concepto de compactad, para ello es recomendable utilizar el concepto de densidad relativa, D_r (Ver 2.2.4).

La relación que existe entre la densidad relativa, D_r , y el índice, N , del SPT es diferente según sea la presión efectiva vertical al nivel del ensayo. De entre las correlaciones existentes y a falta de mejor información, se considera admisible la de Gibbs & Holtz ⁽³⁾ (1957), indicada en la Fig. 2.9.1.

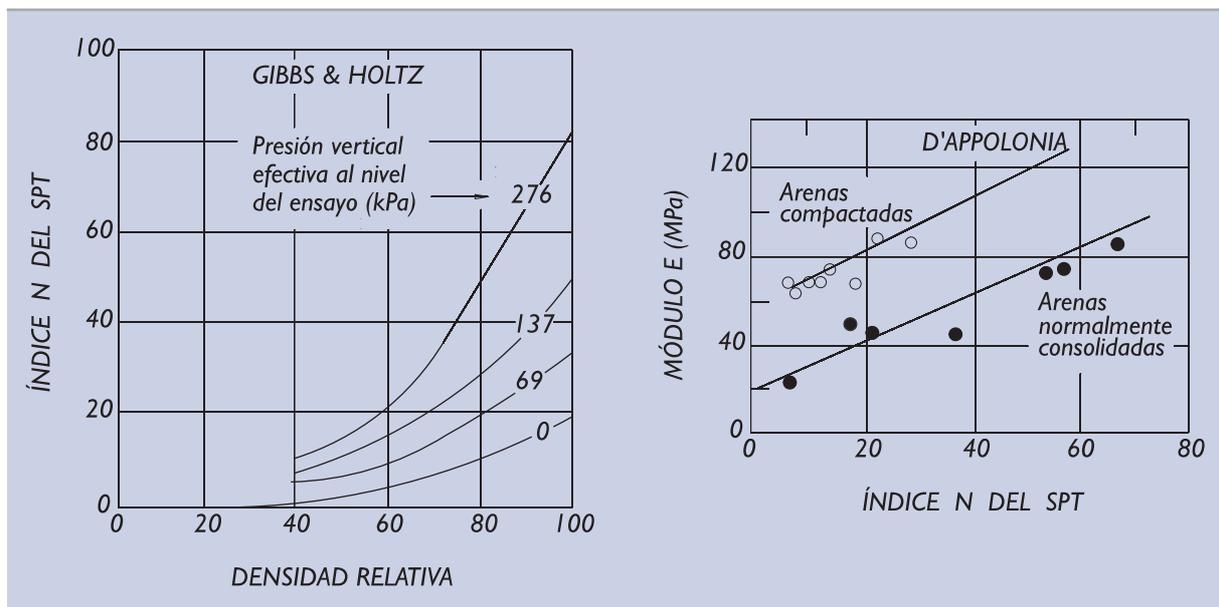
Existe una correlación evidente entre el ángulo de rozamiento de los suelos granulares y el índice N (SPT). La de mayor difusión probablemente sea la definida por Schmertmann ⁽⁴⁾ que puede aproximarse con la siguiente expresión analítica:

$$\operatorname{tg} \phi = \left(\frac{N}{12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{vo}}{p_a}} \right)^{0,34}$$

donde:

- ϕ = ángulo de rozamiento.
- N = índice del ensayo SPT.
- σ'_{vo} = presión vertical efectiva al nivel del ensayo.
- p_a = presión de referencia (1 bar = 100 kPa).

Figura 2.9.1. Correlaciones SPT (arenas)



(3) Gibbs, H. J.; Holtz, N. G. (1957): "Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing". Proc. 4th. ICSMFE. Londres.

(4) Schmertmann, J. H. (1975): "Measurement of In-Situ Shear Strength". Proc. ASCE Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties. Raleigh, USA.

La deformabilidad de las arenas, a efectos de cálculo de asentamientos de cimentaciones superficiales, y a falta de una información más específica, puede estimarse según la correlación de D'Appolonia ⁽⁵⁾ (1970) que se indica también en la Fig. 2.9.1.

Es posible establecer criterios de carga de hundimiento de cimentaciones superficiales o profundas, así como estimaciones de los asentamientos, en base a resultados de ensayos SPT cuando las formaciones son arenosas normales y sobre las que existe experiencia local contrastada. Sólo se pueden obtener valores orientativos respecto a estos criterios cuando los ensayos SPT se realizan en suelos cohesivos o rocas blandas.

En formaciones arenosas calcáreas, particularmente de origen orgánico (conchíferas, coralinas, etc.), se recomienda no utilizar los criterios usuales basados en experiencia del SPT; las cargas de hundimiento podrían resultar excesivamente optimistas.

2.9.2 Penetrómetros dinámicos

La forma más económica y sencilla de ensayar el terreno en profundidad consiste en la hincada de un varillaje con una punta metálica de forma conveniente. El ensayo penetrométrico más difundido en España (y en Europa) es el conocido con el nombre de Borro (NLT 261). Este equipo consiste en un varillaje metálico macizo de 32 mm de diámetro exterior que hincada una puntaza metálica de la forma y dimensiones que se indican en la Fig. 2.9.2. La hincada se realiza con una maza de 65 kg (o con los 63,5 kg del SPT) que cae libremente desde 50 cm de altura. Durante la hincada se van contabilizando los números de golpes para hacer avanzar la hincada 20 cm. El resultado se suele representar en forma de diagrama de ese número de golpes "N_g" obtenido en cada profundidad.

Como quiera que el tamaño de la puntaza es más amplio que el diámetro del varillaje, el rozamiento entre éste y el terreno es pequeño y el resultado del ensayo estaría relacionado con la resistencia del terreno en el entorno de la punta.

La hincada se continúa hasta la profundidad de interés previamente fijada o hasta alcanzar una resistencia elevada. La punta metálica queda perdida en el terreno al recuperar el varillaje.

Para evitar que el varillaje roce con el terreno se le suelen dar, aunque sea manualmente, algunas vueltas. Existen equipos de penetración en los que este giro se hace de una manera regular y donde, además, existe un mecanismo de escape de la maza de golpeo que evita también los posibles rozamientos del cable de izado.

Existe, dentro del equipo Borro, otra puntaza diferente, con forma cónica y de menor tamaño.

Además del equipo Borro existen, aunque se empleen con menos frecuencia, penetrómetros dinámicos como el DIN ligero o el Stump, que se idearon, inicialmente para ser hincados manualmente (sin motor y cabrestante para el izado).

En España están normalizados dos ensayos de penetración dinámica continua:

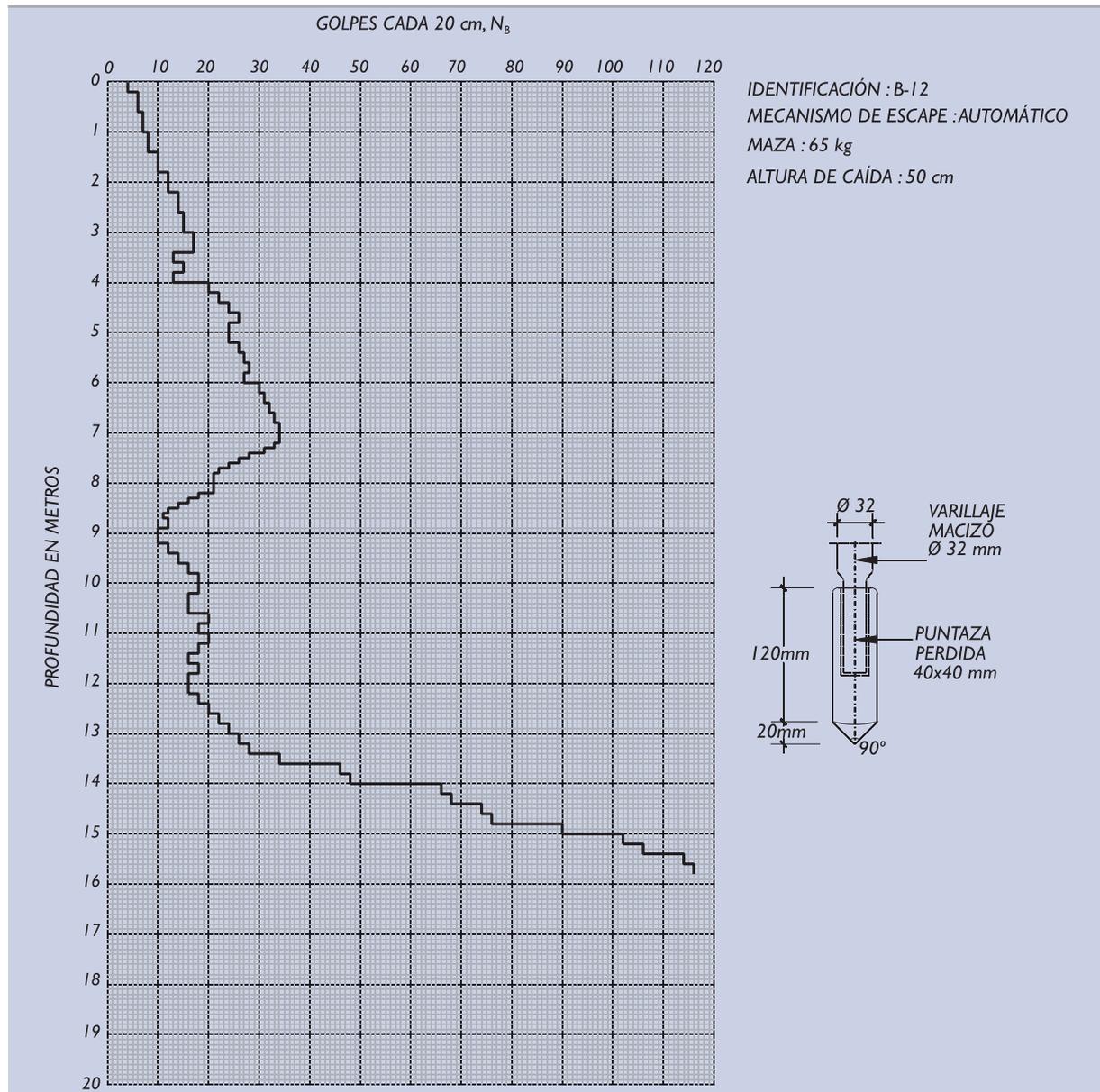
- ◆ DPSH. Norma UNE 103.801.
Ensayo de penetración dinámica superpesado.
- ◆ DPH. Norma UNE 103.802.
Ensayo de penetración dinámica pesado.

Las posibles correlaciones entre los resultados de los diferentes tipos de ensayos penetrométricos pueden investigarse según se indica en 2.9.5.

(5) D'Appolonia, D.J.; D'Appolonia, E. and Brisette, R.F. (1970). Discussion on "Settlement of Spread Footing on Sand". Proc. ASCE, J. Soil Mech. and Found. Engng. Div., 96 (S12), pp. 754-761.

Los penetrómetros dinámicos tienen su mejor campo de aplicación en la determinación de la profundidad de suelos blandos o de consistencia media que apoyan sobre formaciones mucho más resistentes donde la hincada se detiene.

Figura 2.9.2. Ensayo de penetración dinámica Borro



El ensayo de penetración es muy útil para detectar cambios de compacidad en el terreno (zonas más blandas de los rellenos, oquedades, defectos de compactación en terraplenes, etc.). Este ensayo es también útil en la estimación de la facilidad de hincada de pilotes.

Es recomendable realizar ensayos de penetración dinámica en las mismas alineaciones que los sondeos de reconocimiento y/o en los mismos perfiles en que se realicen prospecciones geofísicas; sus resultados permiten confirmar la homogeneidad del terreno entre los puntos reconocidos mediante sondeos o detectar posibles heterogeneidades locales que adviertan sobre la necesidad de densificar la malla de sondeos mecánicos.

En cualquier caso y dadas las posibles variaciones en cuanto a detalles de la ejecución, se recomienda que en los diagramas de resultados de estos ensayos figuren explícitamente los datos siguientes:

- ◆ Peso de la maza y altura de caída.
- ◆ Forma de escape de la maza (manual o automática).
- ◆ Forma de la puntaza, en un pequeño dibujo.

La resistencia al avance de las tuberías de entubación de los sondeos colocadas mediante hinca, así como el control del número de golpes necesarios para hincar el tomamuestras, son datos que pueden servir también para estimar la consistencia del terreno. A esos efectos, sería necesario conocer los detalles de esas hincas.

Se recomienda no utilizar los datos de los penetrómetros dinámicos continuos con el fin de cuantificar cargas de hundimiento o asentos de cualquier tipo de cimentación si no es a través de una experiencia local claramente contrastada por otros métodos.

2.9.3 Penetrómetros estáticos

El ensayo de penetración estático (o CPT “Cone Penetration Test”) consiste en una hinca mediante empuje, a velocidad lenta (1 a 3 cm/s), de una varilla con una punta adecuada, dentro del terreno. El equipo más común en España (y en Europa) es el cono holandés (UNE 103804).

El avance del penetrómetro se realiza en intervalos discontinuos de modo que se pueda medir la resistencia a la penetración de la punta sola o del conjunto completo. Existen equipos automáticos que miden, en una hinca continua, la resistencia al avance en la punta y la resistencia a la penetración por fuste en el mango lateral.

Los equipos varían según su capacidad de empuje y distintas formas de las puntas. Existen normativas en otros países sobre la ejecución del ensayo (DIN 4094, ASTM D-3441) cuya aplicación puede ser de interés.

En los gráficos de resultados conviene incluir un esquema del tipo de punta utilizado, pues este dato no siempre es el mismo (varias normativas). Ver Fig. 2.9.3.

La interpretación de estos ensayos permite determinar la resistencia al corte del terreno y obtener una descripción indirecta del tipo de suelo atravesado y de su compresibilidad. En ese sentido, se necesitarían reconocimientos complementarios por otros métodos para obtener una descripción cierta de la naturaleza del terreno e, incluso, una determinación más exacta de su deformabilidad.

La resistencia al corte del terreno obtenida mediante estos ensayos es especialmente adecuada para el cálculo de la carga de hundimiento de cimentaciones profundas.

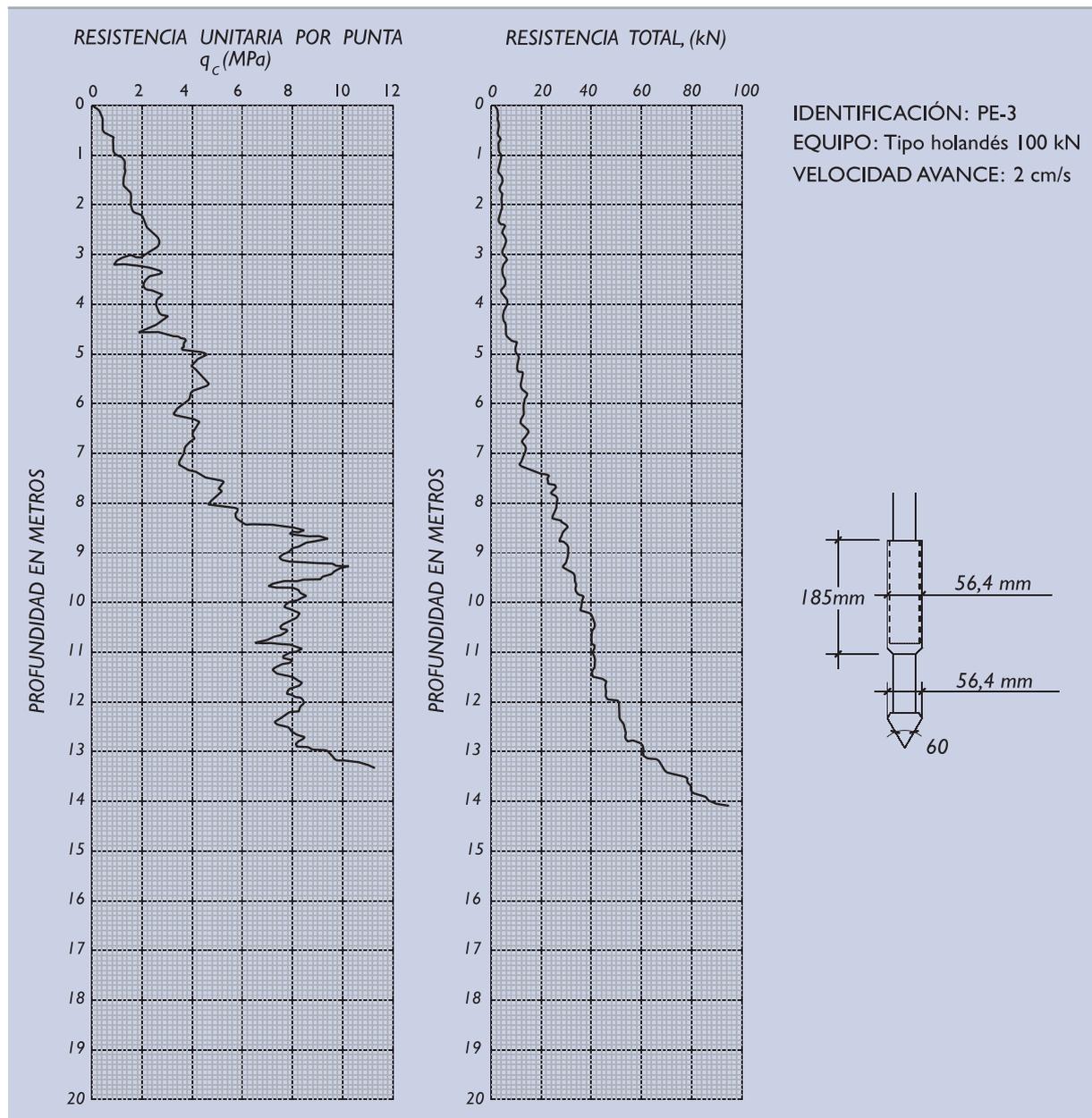
Existe una relación entre la resistencia por la punta en el ensayo de penetración estática, q_c , y la densidad relativa de las arenas. También existe una relación entre esa resistencia de las arenas y el módulo de deformación que se debe utilizar en los cálculos de asentos de cimentaciones superficiales. A falta de mejor información se consideran aceptables las correlaciones de Schmertmann ⁽⁶⁾ (1978) que se indican en la Fig. 2.9.4.

Para suelos granulares existe una correlación evidente entre la resistencia por punta del ensayo de penetración estática y el ángulo de rozamiento. Aunque esta correlación depende de varios factores, como valor orientativo se puede usar la siguiente expresión dada por Robertson y Campanella ⁽⁷⁾:

(6) Schmertmann, J.H. (1978) «Guidelines for Cone Penetration Test Performance and Design». U.S. Federal Highway Administration. Report FHVV-TS-78-209.

(7) Robertson P.K. y Campanella R.G. (1983) «Interpretation of Cone Penetration Test». Canadian Geotechnical Journal. Vol. 20.

Figura 2.9.3. Ensayo de penetración estática



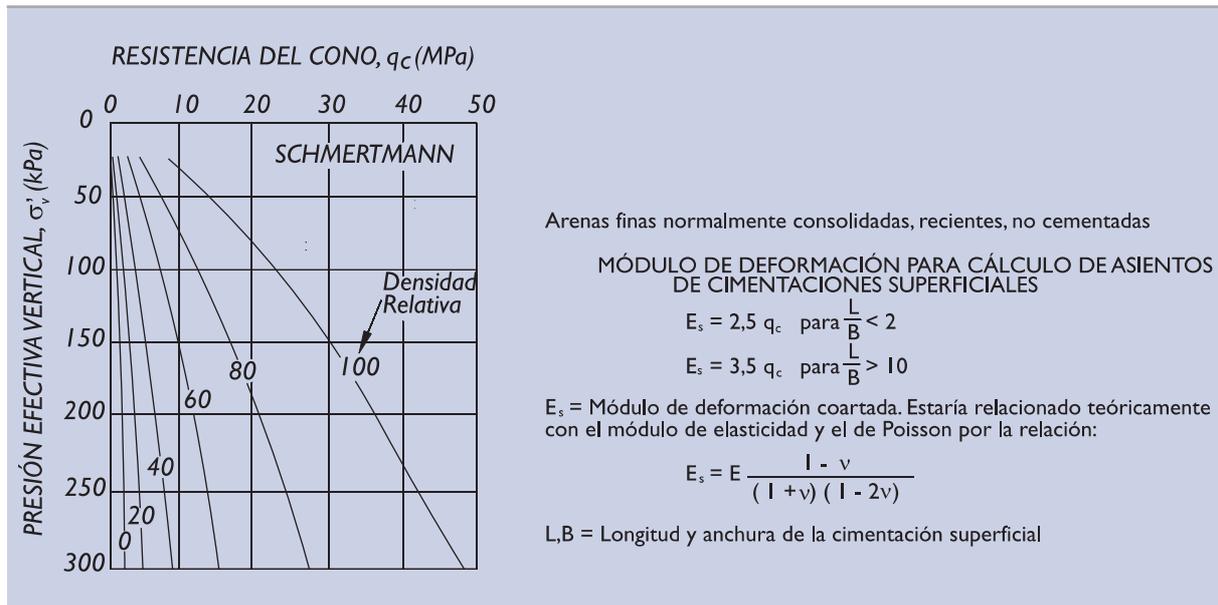
$$\operatorname{tg} \phi = 0,10 + 0,38 \cdot \log_{10} \frac{q_c - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}$$

donde:

- ϕ = ángulo de rozamiento.
- q_c = resistencia por punta.
- σ_{vo} = presión vertical total al nivel del ensayo.
- σ'_{vo} = presión vertical efectiva al nivel del ensayo.

El ensayo de penetración estática es especialmente adecuado para medir la resistencia al corte sin drenaje de los suelos cohesivos blandos. La relación que se suele establecer para los suelos cohesivos de los fondos marinos es:

Figura 2.9.4. Correlaciones del ensayo de penetración estática



$$s_u = \frac{1}{N_k} (q_c - \sigma_v)$$

donde:

- s_u = Resistencia al corte sin drenaje.
- q_c = Resistencia unitaria por la punta al avance del cono.
- σ_v = Presión vertical total en el terreno al nivel del ensayo.
- N_k = Factor adimensional de proporcionalidad.

El factor N_k está próximo a 15. El ingeniero puede utilizar este dato como referencia básica, pero sabiendo que es un factor variable dependiente del tipo de terreno, de la profundidad y de otros posibles factores aún no bien conocidos.

2.9.4 El piezocono. CPTU

El piezocono o CPTU consiste en un penetrómetro estático continuo en cuya punta se añade un piezómetro. El equipo permite el registro continuo de resistencia por punta y por fuste y además el control de las presiones intersticiales generadas durante la hinca, así como la evolución de su disipación cuando la hinca se detiene.

Este tipo de penetrómetros es muy adecuado para el reconocimiento de suelos blandos, fundamentalmente para determinar parámetros destinados al estudio de problemas de consolidación y problemas de estabilidad que impliquen roturas profundas a través de suelos blandos.

Los registros que se obtienen durante la hinca del piezocono permiten la identificación de niveles de diferente permeabilidad aunque tengan estos niveles pequeños espesores. Este aspecto es de especial interés cuando se trata de evaluar las condiciones de drenaje de los procesos de consolidación.

No existe una normativa claramente establecida, aunque sí hay una literatura técnica abundante acerca de su interpretación.

Para interpretar los resultados medidos con el piezocono se suelen calcular, a cada profundidad, los siguientes parámetros auxiliares:

- ◆ Resistencia a la penetración adimensional, Q_t , de acuerdo con la expresión siguiente:

$$Q_t = \frac{q_c - \sigma_v}{\sigma'_v}$$

donde:

- q_c = resistencia unitaria al avance en la punta del cono en la zona de interés.
- σ_v = presión vertical total natural (antes de hacer el ensayo) en la zona de interés.
- σ'_v = presión vertical efectiva natural (antes de hacer el ensayo) en la zona de interés.

- ◆ Incremento relativo de presión intersticial, B_t , definida por:

$$B_t = \frac{u_c - u_o}{q_c - \sigma_v}$$

donde:

- u_c = presión intersticial medida por el piezocono en el nivel de interés.
- u_o = presión intersticial preexistente, en el nivel de interés.
- q_c, σ_v = igual significado que en el caso anterior.

- ◆ Fricción lateral relativa, F_r , calculada como sigue:

$$F_r = \frac{f_s}{q_c - \sigma_v}$$

donde f_s es la fricción lateral medida por el piezocono en el nivel de interés y q_c y σ_v tienen el mismo significado antes indicado.

Existen correlaciones basadas en la experiencia que permiten clasificar el tipo de terreno en función de estos parámetros. Una de ellas ⁽⁸⁾, de uso bien extendido, se incluye en la Fig. 2.9.5.

Para interpretar los resultados de los ensayos de disipación de presiones intersticiales (evolución de la presión medida por el piezómetro cuando el avance del cono se detiene) es preciso calcular, del diagrama correspondiente, el valor que corresponde al 50% de disipación. Este tiempo puede obtenerse con las mismas técnicas que se utilizan en la interpretación de los tiempos de consolidación de los ensayos edométricos (método logarítmico o de Casagrande y método de la raíz cuadrada del tiempo, por ejemplo).

También se necesita conocer el índice de rigidez I_r , definido mediante la siguiente igualdad:

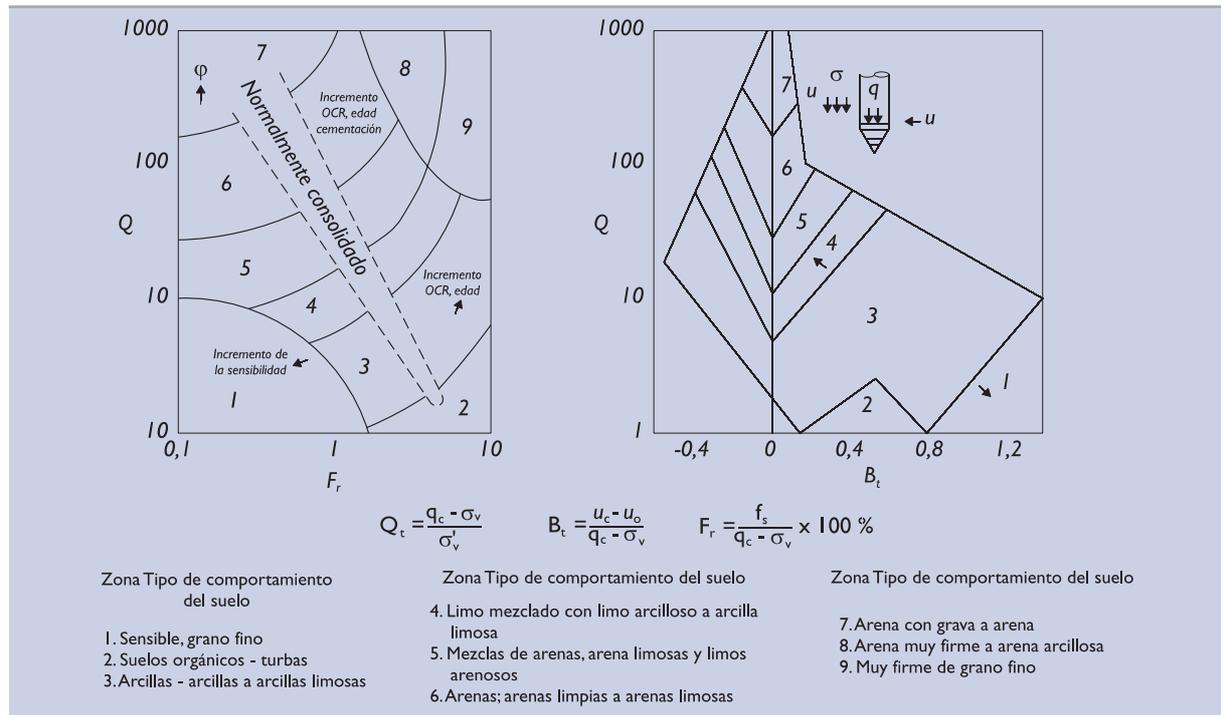
$$I_r = \frac{G}{s_u}$$

donde:

- G = módulo de rigidez transversal del suelo.
- s_u = resistencia al corte sin drenaje.

(8) Robertson, P.K. (1990). "Soil Classification Using the Cone Penetration Test". Canadian Geotechnical Journal, 27 (1), p. 151-158.

Figura 2.9.5. Clasificación del suelo a partir de los resultados del piezocono CPTU



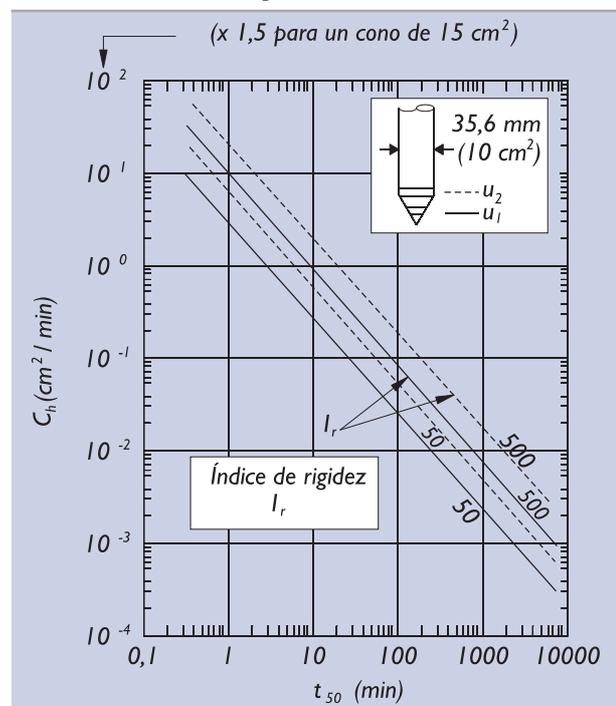
Con estos datos (t_{50} e I_r) se puede estimar el valor del coeficiente de consolidación radial, c_h , del nivel donde se detenga la hinca del cono y se realice el ensayo de disipación. Esa estimación está basada en experiencias previas ⁽⁹⁾, tal como la que se recoge en la Fig. 2.9.6.

2.9.5 Correlación entre ensayos de penetración

Entre distintos penetrómetros dinámicos continuos se puede establecer una equivalencia de manera que la energía específica de la hinca sea semejante.

El índice N_B del ensayo tipo Borro (con escape automático de la maza de 65 kg cayendo de 50 cm de altura con puntaza cuadrada de 4 x 4 cm y medida del número de golpes para avanzar la hinca 20 cm) suele ser mayor que el N (SPT) a grandes profundidades y menor en los primeros metros. La correlación, sin embargo, es muy dispersa y, de ser necesaria su definición, debe ser analizada en cada formación y a cada profundidad o utilizar correlaciones previamente establecidas o basadas en experiencias locales contrastadas.

Figura 2.9.6. Gráfico para la determinación de c_h a partir de t_{50} y un índice de rigidez (I_r) entre 50 y 500



(9) Robertson, P.K. et al (1992). "Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Test". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, n° 4, pp. 539-550.

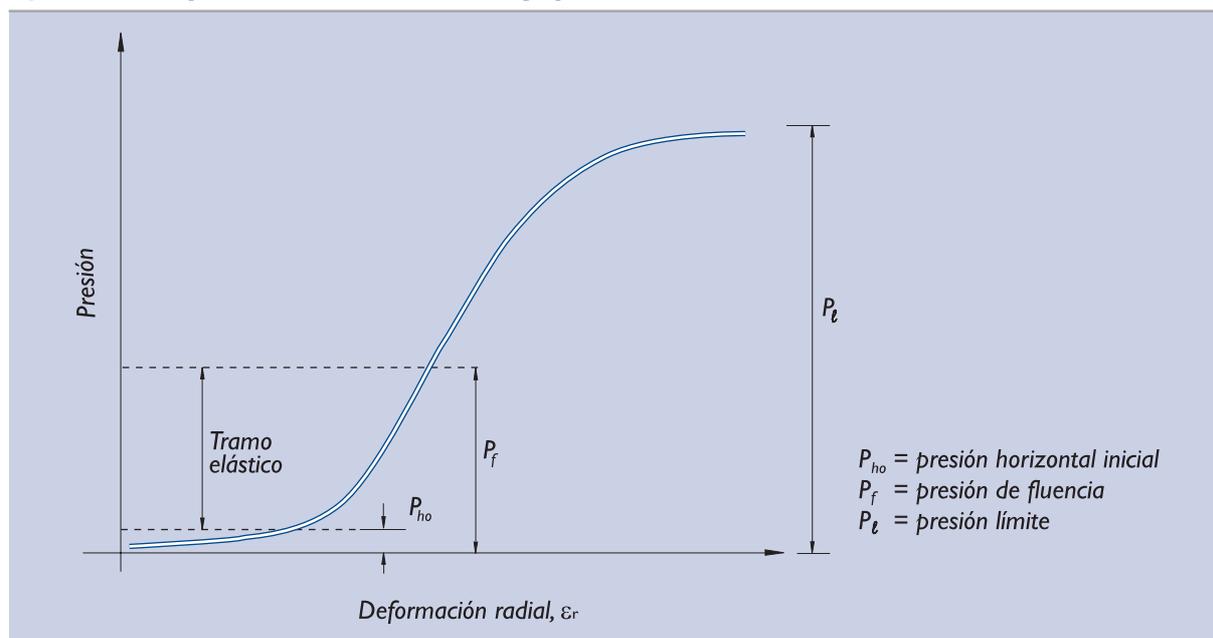
2.9.6 Presiómetros y dilatómetros

Estos ensayos consisten en la aplicación de una presión en el interior del terreno midiendo la deformación que se provoca. Normalmente el ensayo se realiza en el interior de un sondeo previamente perforado (PBP, Pre-Boring Pressuremeter) donde se introduce el equipo presiométrico. Recientemente se ha comenzado a utilizar el presiómetro autoperforador (SBP, Self-Boring Pressuremeter) que va alojado en el propio equipo de perforación y, en consecuencia, no requiere la separación del ensayo en dos fases. Con este nuevo equipo se evita la relajación de tensiones y deformación previa (incluso posible rotura) que se puede producir antes de posicionar los presiómetros convencionales. También pueden utilizarse presiómetros hincados en suelos blandos (PIP, Push-In Pressuremeter).

Estos ensayos no están normalizados en España, realizándose normalmente al amparo de la normativa francesa (NFP 94-110).

En los presiómetros se utiliza un recinto cerrado por una membrana que aloja un volumen de fluido controlable. El aumento del volumen de ese fluido comprime la membrana contra las paredes del sondeo. Con estos dos datos (volumen y presión) se puede preparar el diagrama deformación-presión que se ilustra en el esquema de la Fig. 2.9.7.

Figura 2.9.7. Esquema del resultado de un ensayo presiométrico



Normalmente los resultados del ensayo presiométrico se representan en gráficos cuya abscisa corresponde a la deformación radial, ε_r , definida por la expresión:

$$\varepsilon_r = \frac{r - r_0}{r_0}$$

donde:

- r = radio medio de la cavidad en un momento del ensayo.
- r_0 = radio inicial de referencia.

Para el ensayo de rocas y de suelos muy firmes se pueden utilizar equipos más robustos, que se denominan dilatómetros y que miden la deformación mediante extensómetros, con lo cual se obtiene la deformación radial directamente y con mayor precisión.

El tarado del equipo, antes de su utilización, permite conocer qué parte de la presión que se aplica es necesaria para deformar la membrana y ese valor se debe restar a la presión aplicada para obtener la presión corregida que es la que debe utilizarse en el gráfico de resultados.

La interpretación del ensayo presiométrico permite conocer tres presiones de interés:

- a. Presión horizontal inicial, p_{ho} . Es la presión que ha de ejercerse para establecer el contacto membrana-terreno y deformarlo hasta su posición original, antes de practicar el sondeo. En los presiómetros convencionales esa presión corresponde al quiebro de la curva presión-deformación (punto de máxima curvatura). Existen procedimientos detallados para determinarla ⁽¹⁰⁾.
- b. Presión de fluencia, p_f . Es la presión donde acaba un tramo recto que suele aparecer en estos diagramas. A partir de ella, las deformaciones son claramente no lineales. Su determinación detallada puede realizarse con ciertas técnicas, aunque en la práctica rutinaria suele definirse casi a simple vista.
- c. Presión límite, p_l . Es la presión que provoca una deformación radial del 41% (deformación volumétrica del 100%). Si el Ensayo no ha alcanzado esa deformación, es necesario hacer una extrapolación para obtenerla.

Los datos mencionados (p_{ho} , p_f y p_l) pueden utilizarse para el proyecto de cimentaciones superficiales y profundas tal como se indica más adelante, en la Parte 3 de estas Recomendaciones.

Además, la interpretación de la curva presiométrica permite obtener, si bien sólo con una aproximación grosera, ciertos parámetros característicos del comportamiento del terreno, tal como se indica a continuación.

El coeficiente de empuje al reposo, K_o , del terreno se puede obtener mediante la expresión siguiente:

$$K_o = \frac{p_{ho} - u}{\sigma'_{vo}}$$

donde:

p_{ho} = presión horizontal inicial, deducida del ensayo.

u = presión intersticial al nivel del ensayo.

σ'_{vo} = presión vertical efectiva al nivel del ensayo.

El módulo de rigidez transversal, G , del terreno, para el nivel de deformaciones del ensayo y para la dirección de carga correspondiente (perpendicular al eje del sondeo), se puede obtener mediante la expresión:

$$G = V_o \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

donde:

Δp = aumento de presión entre los dos puntos donde se advierte una respuesta lineal.

ΔV = aumento de volumen entre esos dos mismos puntos.

V_o = volumen de referencia.

(10) Véase, por ejemplo, la tesis doctoral de H. Cano Linares "Técnicas 'in situ' para la caracterización del comportamiento elástico no lineal de suelos duros". E.T.S. Ing. Caminos, Canales y Puertos. U.P.M. Madrid 2004.

Normalmente se debe utilizar como volumen de referencia el correspondiente al inicio del tramo elástico (tramo recto).

Se define como módulo presiométrico, E_p , al valor siguiente:

$$E_p = \frac{G}{2(1 + \nu)}$$

donde:

G = módulo de rigidez transversal, antes definido.
 ν = módulo de Poisson.

El módulo de Poisson no se puede determinar con este ensayo. Si se quiere conocer el módulo presiométrico habrá que hacer alguna hipótesis sobre el valor adecuado de ν .

Los ensayos presiométricos permiten conocer la naturaleza del terreno ya que, para su ejecución, requieren la extracción previa del terreno donde ha de alojarse el equipo de ensayo. Estos testigos deben ser objeto de análisis de laboratorio; al menos deben realizarse con ellos los ensayos de identificación más elementales.

En suelos arcillosos saturados es posible obtener un valor recomendado de la resistencia al corte sin drenaje, s_u , mediante un análisis específico de la zona no lineal del final de la curva presiométrica (presión de ensayo comprendida entre p_f y p_i). La expresión correspondiente es:

$$s_u = \frac{p_2 - p_1}{\ln\left(\frac{V_2 - V_o}{V_1 - V_o}\right)}$$

donde:

p_1, p_2 = presiones cualquiera en el tramo $p_f - p_i$.
 V_1, V_2 = volúmenes de fluido en el presiómetro para esas mismas presiones.
 V_o = volumen de referencia. Se tomará el que corresponde a p_{ho} .

Teóricamente el valor de s_u sería independiente de los puntos 1 y 2 que se elijan. Pero será necesario tantear distintos valores para obtener un valor razonable.

En suelos arenosos permeables, siempre que se garantice que durante el ensayo no se generan presiones intersticiales importantes, se puede obtener, de esa misma rama curva final del ensayo, una idea aproximada del ángulo de rozamiento interno del terreno, mediante la expresión siguiente ⁽¹¹⁾:

$$\phi = 7^\circ (1 + 10 s) > 30^\circ$$

donde:

$$s = \frac{\ln\left(\frac{p_2 - u_o}{p_1 - u_o}\right)}{\ln\left(\frac{r_2 - r_o}{r_1 - r_o}\right)}$$

(11) Expresión simplificada deducida del gráfico de la publicación de Mair, R.J. y Word, D.M. (1987). "Pressuremeter Testing: Methods and Interpretation". Butterworths. London. Para ello se ha supuesto un suelo granular convencional cuyo ángulo de rozamiento crítico sea de 30° .

donde:

- p_1, p_2 = presiones cualesquiera en el tramo $p_f - p_l$.
- r_2, r_1 = radios del presiómetro para esas mismas presiones.
- r_o = radio de referencia, se tomará el que corresponda a p_{ho} .
- u_o = presión hidrostática del agua intersticial al nivel del ensayo.

2.9.7 Ensayos de molinete

El ensayo de molinete o “vane test”, realizado en el fondo de sondeos o mediante hinca directa hasta el nivel de ensayo, está especialmente indicado para investigar la resistencia al corte sin drenaje de suelos arcillosos blandos.

Existen normalizaciones de este ensayo (ASTM D 2573, DIN 4096). En España está en vías de normalización.

La interpretación de sus resultados permite obtener, además, una estimación indirecta de la deformabilidad del terreno.

Los parámetros de resistencia que se obtienen están igualmente indicados para la determinación de cargas de hundimiento de cimentaciones superficiales o profundas en condiciones no drenadas así como para el estudio de estabilidad de taludes de dragado o relleno, también en condiciones no drenadas.

2.9.8 Ensayos de placa de carga

Los ensayos de placa de carga están especialmente indicados en el estudio de la capacidad portante de rellenos compactados y también de terrenos naturales.

La interpretación de sus resultados permite obtener valores de los módulos de deformación aplicables a la predicción de asentos así como una estimación aproximada de las cargas de hundimiento de las cimentaciones superficiales.

Dado que el ensayo afecta a una zona pequeña del terreno para los tamaños usuales de las placas (ver NLT 357, ϕ 30, 60 ó 76,2 cm), estos ensayos no permiten conocer la deformabilidad del terreno más que en la zona próxima a la superficie del ensayo.

2.9.9 Ensayos de permeabilidad en sondeos y calicatas

El control de las pérdidas de agua en calicatas cuyo entorno se haya saturado previamente, o en sondeos llenos de agua hasta niveles superiores al nivel freático del entorno (ensayo Lefranc) o en sondeos obturados con presión forzada (ensayo Lugeon), permite una estimación aproximada de la permeabilidad del terreno.

La permeabilidad obtenida de estos ensayos puede utilizarse en el análisis cualitativo de las condiciones de drenaje de un determinado problema. Si la permeabilidad de un determinado nivel de terreno resultase ser un parámetro crítico de proyecto, entonces tal parámetro debiera determinarse mediante ensayos de bombeo específicamente pensados para el análisis del problema concreto.

En el Apéndice I se indican fórmulas útiles en la interpretación de los resultados de ensayos de permeabilidad “in situ”.

2.9.10 Pruebas de campo y otros ensayos “in situ”

Para el estudio de problemas geotécnicos que puedan tener una repercusión importante puede ser recomendable realizar pruebas de campo especialmente destinadas al análisis del problema en cuestión.

Entre ellas se destacan las siguientes:

- ◆ Son relativamente frecuentes los estudios de asentos y consolidación de zonas blandas mediante terraplenes de prueba instrumentados.
- ◆ Son especialmente recomendables las pruebas de hinca de pilotes, que hoy se pueden instrumentar y analizar detalladamente.
- ◆ Son frecuentes, y recomendables en grandes obras, las pruebas de carga de hundimiento de pilotes y de resistencia de anclajes o elementos en tracción horizontal.
- ◆ Son de particular interés, por su menor dificultad de ejecución, las pruebas de empuje o tiro horizontal entre pilotes. De ellas puede deducirse con buena precisión los parámetros de deformabilidad del terreno para el estudio de pilotes sometidos a esfuerzos horizontales con distintas configuraciones.
- ◆ Los ensayos de bombeo son especialmente útiles en el análisis de problemas de filtración y se consideran imprescindibles cuando el reconocimiento está encaminado al estudio de obras que después requieran un drenaje forzado con achique permanente.

En cuanto a otros equipos de ensayos in situ se destacan los siguientes:

- ◆ Existen equipos de penetración mixtos (estático-dinámicos) que permiten atravesar zonas duras, mediante hinca y proseguir el ensayo de penetración estática a mayor profundidad. Aunque su utilización puede ser de interés en formaciones blandas con niveles cementados o encostrados más duros, estos equipos mixtos están poco difundidos.
- ◆ Existen equipos de ensayo de permeabilidad in situ (permeámetros autoperforadores) así como una gran variedad de otros equipos de ensayo en sondeos (placa de carga en el fondo) que suelen resultar interesantes en algunos casos, pero que son aún de escasa difusión.

Se recomienda a los planificadores de las campañas de reconocimiento geotécnico que, en caso de necesitar algún equipo especial de reconocimiento in situ, consulten a las empresas especialistas, ya que cada vez existen más procedimientos definidos con propósitos específicos que pueden ser de interés especial en algunas campañas de reconocimiento geotécnico.

Existen una gran variedad de otros ensayos “in situ” y pruebas de campo (resistencia al corte de pedraplenes y escolleras, hundimiento de cimentaciones superficiales, excavaciones instrumentadas, redes de observación de evolución de presiones intersticiales, etc.) que enlazan ya con la auscultación y observación del comportamiento. Son de gran interés pero fuera ya del ámbito de las recomendaciones generales de esta ROM.

2.10 TOMA DE MUESTRAS

La toma de muestras es una de las actividades importantes de las campañas de reconocimiento geotécnico. Por ese motivo ha de estar planificada antes de comenzar la campaña de reconocimientos.

Las muestras pueden obtenerse de sondeos, de calicatas o de lugares especificados donde no se haya hecho perforación o excavación previa.

Las muestras pueden ser alteradas, esto es, que después de tomadas tengan otra densidad o humedad distintas de las originales o inalteradas, esto es, en las que la humedad y la densidad (y por lo tanto la resistencia, la deformabilidad y la permeabilidad) sean lo más próximas posibles a las originales. En cualquier caso las muestras han de ser representativas del suelo que se quiere ensayar; en ese sentido deben evitarse siempre los lavados o segregaciones de las muestras salvo que ese aspecto, por alguna razón singular, no tenga importancia en el problema en estudio.

Las muestras alteradas pueden tomarse manualmente, con pico y pala, con excavadoras mecánicas o proceder de testigos de sondeos. Pueden transportarse en sacos o bolsas.

Las muestras inalteradas o poco alteradas pueden tomarse con tomamuestras específicos (hincando tubos cortos biselados) de paredes de pozos, zanjas o calicatas previamente apuntalados. Deben empaquetarse, transportarse y conservarse en laboratorio hasta su ensayo de manera que no sufran alteración.

La toma de muestras más usual de los reconocimientos geotécnicos se realiza en sondeos mediante tomamuestras específicos adaptados al tipo de terreno. En la Tabla 2.10.1 se resume información relativa a los más empleados.

La toma de muestras inalteradas o poco alteradas de suelos granulares limpios no es posible por procedimientos convencionales. En algunas arenas resultan eficaces los tomamuestras de pistón tipo Osterberg o tipo Bishop.

La toma de muestras debe ser supervisada por el técnico responsable de los trabajos de campo. Es de gran importancia que el carácter más o menos alterado de las muestras tomadas sea estimado por un técnico experto.

El procedimiento debe quedar documentado indicando, para cada muestra o grupo de muestras, su procedencia (sondeo, calicata u otro punto de coordenadas conocidas), la columna litológica correspondiente al lugar donde se hace la toma, la indicación expresa de su profundidad, la posición del nivel freático en el lugar donde se tomó la muestra así como cualquier observación que el técnico responsable crea oportuna.

Ya que las muestras se toman para hacer ensayos de laboratorio, la programación del número de ellas y su ubicación sólo deberá definirse tras considerar los ensayos que resulten necesarios para analizar los problemas objeto del informe geotécnico.

Tabla 2.10.1. Procedimientos habituales de toma de muestras en profundidad

	Tipo de terreno	Calidad de la muestra
TUBOS TOMAMUESTRAS HINCADOS En el fondo de los sondeos se pueden hincar tubos de pared delgada (Shelby) que alteran poco al terreno que queda alojado en su interior. Existen distintos procedimientos según los suelos sean blandos (tomamuestras hincados a presión o por vibración, "vibrocore", y con distintos sistemas de retención del testigo) o a percusión cuando el terreno es de compacidad media e incluso alta.	Suelos cohesivos de compacidad muy floja, floja y media y algunos suelos granulares con suficientes finos y no muy densos.	Poco alterada
TUBOS PORTAMUESTRAS En los sondeos mecánicos realizados a rotación se aloja un tubo en el interior del elemento inferior de la perforación que protege parcialmente la muestra a tomar de los efectos de la rotación.	Suelos cohesivos de consistencia firme a muy firme y rocas.	Algo alterada
TESTIGOS DE PERFORACIÓN En los sondeos perforados con corona hueca se puede obtener en suelos firmes el núcleo de terreno no destruido durante el avance.	Suelos cohesivos de consistencia firme o muy firme y rocas.	Algo alterada a muy alterada
CUCHARA SPT La hincada del tubo que conforma la cuchara del SPT permite, en buen número de suelos, obtener una muestra del terreno atravesado durante su hincada.	Suelos cohesivos no muy firmes y suelos granulares sin gravas no muy densos y con algunos finos.	Muy alterada

2.11 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio constituyen hoy la herramienta principal para el estudio de las características geotécnicas del terreno. Rara vez será posible un estudio geotécnico correcto que no incluya ensayos de laboratorio.

Existen ensayos de laboratorio destinados a definir la naturaleza del suelo, esto es, su composición granulométrica y mineralógica, sus propiedades índice, etc. Existen ensayos de laboratorio especialmente destinados al estudio de la resistencia, de la deformabilidad y de la permeabilidad.

Siempre que se haga un ensayo de laboratorio debe quedar constancia clara de la muestra sobre la que se ha hecho, debe constatarse si la muestra está total o parcialmente alterada o si se considera inalterada. Debe dejarse constancia de la forma en que fue embalada, transportada y conservada en el laboratorio hasta su ensayo, así como los procedimientos con los que se hicieron los ensayos de laboratorio.

2.11.1 Ensayos de identificación de suelos

Dentro de este grupo de ensayos de laboratorio se consideran incluidos los siguientes:

- ◆ Ensayos granulométricos por tamizado y por sedimentación (UNE 103101:1995 y UNE 103102:1995).
- ◆ Ensayo de límites de Atterberg (UNE 103103:1994 y UNE 103104:1993).
- ◆ Densidades mínima y máxima de arenas (UNE 103105:1995 y UNE 103106:1993).
- ◆ Determinaciones del peso específico de las partículas (UNE 103302:1994).
- ◆ Análisis químicos del suelo. Contenido en sulfatos, carbonatos y materia orgánica como más interesantes (UNE 103201:1996 cuantitativa, ó UNE 103202:1995 cualitativa, UNE 103200:1993 y UNE 103204:1993).
- ◆ Análisis químicos del agua intersticial.

Estos ensayos se pueden realizar con muestras alteradas o inalteradas. En cualquier caso exigen desmenuzar previamente la muestra.

Con los dos primeros ensayos (granulometría y límites de Atterberg) es posible clasificar los suelos dentro de tipos cuyas características geotécnicas son similares. A estos efectos se recomienda utilizar el sistema unificado de clasificación de suelos, que está ampliamente difundido.

También se consideran de este grupo los ensayos de densidad seca y humedad natural que permiten conocer las dos variables más importantes del estado del suelo. Su determinación debe hacerse, sin embargo, en muestras inalteradas o poco alteradas.

2.11.2 Ensayos de compresión simple de suelos

Están indicados para ensayar muestras de suelos cohesivos de consistencia media, firme o muy firme, inalteradas o poco alteradas, así como suelos cohesivos recompactados. UNE 103400:1993.

De su resultado se obtiene una idea precisa de la resistencia al corte del suelo en condiciones de saturación similares a las del ensayo.

El resultado puede ser poco preciso en arcillas que muestren síntomas de fisuración.

Siempre que se haga este ensayo se recomienda que se determine específicamente, en cada probeta, la humedad y la densidad seca antes del ensayo.

La resistencia a la compresión simple de los suelos arcillosos puede calificarse de acuerdo con la siguiente escala:

Consistencia de los suelos arcillosos	Ensayo manual	Resistencia a compresión simple (kN/m ²)
Muy blanda	Se extruye entre los dedos	0-25
Blanda	Se puede moldear fácilmente	25-50
Media	Se moldea con dificultad	50-100
Firme	Se puede deformar con el dedo pulgar	100-200
Muy firme	Se puede arañar con la uña del pulgar	200-500
Dura	Difícil de arañar	>500

2.11.3 Corte directo de suelos, gravas y escolleras finas

Está indicado para cualquier tipo de muestra de suelos cohesivos o granulares, estén o no alterados. Evidentemente la preparación de probetas de ensayo procedentes de muestras arenosas inalteradas es complicada y requiere técnicas especiales que desaconsejan su utilización.

El ensayo de corte directo puede realizarse con las probetas semisaturadas, tal como esté la muestra de la que procedan, o con una saturación adicional provocada en el equipo de ensayo.

Del ensayo se puede obtener una estimación aproximada de la resistencia al corte. Las condiciones de deformación son tan poco homogéneas en la caja de corte que no se debe esperar precisión en los parámetros resistentes. Por ese motivo su utilización sólo es aconsejable cuando no existe la posibilidad de hacer ensayos triaxiales.

Existe una versión de ensayo de corte directo normalizado en España UNE 103401:1998.

Para el estudio de suelos de grano grueso y, sobre todo, para el caso de gravas y escolleras finas (materiales de enrase de las banquetas) son necesarios equipos de grandes dimensiones. En España se dispone de cajas de corte de hasta 1 m × 1 m.

2.11.4 Ensayo triaxial de suelos

El ensayo está especialmente indicado para conocer la resistencia y la deformabilidad del suelo ante distintos niveles de confinamiento. Se puede realizar con muestras de cualquier tipo de suelo ya sean alteradas o inalteradas. Es difícil, sin embargo, preparar probetas inalteradas de suelos granulares.

El ensayo se puede hacer con probetas de distinto tamaño. Usualmente (UNE 103402:1998) se ensayan probetas cilíndricas de altura igual al doble del diámetro. Los diámetros usuales mínimos son 1 1/2" y es posible ensayar en España probetas de hasta 9" de diámetro con cierta normalidad cuando el suelo contiene gravas de hasta 2".

El ensayo suele hacerse con o sin consolidación previa y rompiendo con el drenaje abierto o cerrado. Son típicos los ensayos:

- ◆ UU Sin consolidación previa y rotura sin drenaje.
- ◆ CU Con consolidación previa y rotura sin drenaje.
- ◆ CD Con consolidación previa y rotura con drenaje.

El ensayo tipo CU, se puede hacer con o sin medida de las presiones intersticiales de la probeta.

El ensayo se suele realizar con probetas saturadas previamente con una contrapresión de 6 bares, aunque el ensayo UU puede hacerse con probetas no saturadas.

En cada ensayo triaxial se suelen romper tres probetas, cada una de ellas sometidas a una presión de célula que supera en 0,5, 1 y 3 bares a la contrapresión de saturación. Es posible y aconsejable indicar otras presiones de ensayo que puedan ser más adecuadas al problema que se investiga.

Durante la fase de carga vertical del ensayo hasta rotura, se controla la deformabilidad tomando nota de la carga para cada 0,5% adicional de reducción de altura de la probeta. El conocimiento de esos datos de deformación es esencial para deducir la deformabilidad del suelo.

De la interpretación de ensayos triaxiales se puede obtener los parámetros de resistencia y deformación del suelo en condiciones no drenadas (ensayos UU) o drenadas (ensayos CU con medida de presiones intersticiales o ensayos CD).

Los resultados de resistencia y deformación de suelos obtenidos de ensayos triaxiales son aplicables al estudio de todos los problemas geotécnicos.

2.11.5 Ensayos edométricos

Los ensayos edométricos están especialmente indicados para estudiar los asentos de suelos arcillosos blandos saturados. Pueden realizarse con muestras inalteradas de suelos cohesivos o muestras recompactadas de cualquier material.

Estos ensayos suelen realizarse incrementando la carga vertical en escalones, de manera que cada nueva carga duplica la compresión vertical existente en el escalón anterior. El ensayo suele alcanzar la carga vertical máxima de 1 MN/m² aunque es posible especificar cargas mayores si el problema que se pretende analizar lo requiere. El ensayo incluye también el control de deformaciones durante la descarga.

Cada escalón de carga del ensayo edométrico se mantiene durante un día. Se recomienda mantener este tiempo mínimo de espera y, por lo tanto, se desaconseja especificar duraciones menores al solicitar la realización de estos ensayos.

Los ensayos edométricos suelen realizarse con probetas saturadas aunque es posible, en casos especiales, hacerlos con humedad menor o saturarlos después de haber colocado cierta sobrecarga. Estas variantes pueden ser de interés en el estudio del colapso o la expansión de suelos metaestables.

De la interpretación de los ensayos edométricos se deducen parámetros geotécnicos relativos a la deformabilidad y permeabilidad del suelo especialmente indicados para el estudio de problemas de consolidación. Existe una norma española, UNE 103405:1994, que regula la realización de este ensayo.

2.11.6 Ensayos de compactación

Los ensayos de compactación están indicados para el estudio del efecto de la humedad en la densidad máxima que puede alcanzarse al compactar un suelo. Se realizan con muestras de cualquier tipo de suelo hasta gravas que puedan tener 25 mm (1") de tamaño máximo (aprox.).

Los ensayos más tradicionales son el Proctor Normal (UNE 103500:1994) y el Proctor Modificado (UNE 103501:1994). El segundo se realiza compactando en moldes más grandes y con energías mayores y por eso suelen alcanzar densidades claramente más altas (5 a 15% mayores que las correspondientes al P.N.).

El resultado de estos ensayos es especialmente aplicable al control de calidad de compactación de rellenos.

2.11.7 Permeabilidad

La determinación del coeficiente de permeabilidad se puede hacer en laboratorio mediante permeámetros de carga constante (UNE 103403:1999) o variable.

Las condiciones de ensayo, tales como tamaño de las muestras, forma de preparación, gradientes hidráulicos etc., deben especificarse debidamente, ya que no existe una normativa claramente establecida para todas las variantes de este tipo de ensayos.

La permeabilidad de los suelos cohesivos puede deducirse de los ensayos edométricos.

2.11.8 Ensayos dinámicos

Para el estudio de los efectos de cargas dinámicas cíclicas y principalmente el de acciones sísmicas fuertes, existen equipos dinámicos que permiten obtener parámetros geotécnicos adecuados.

Para problemas de resistencia frente a cargas cíclicas (licuefacción) el ensayo más indicado es el de corte simple.

Para problemas de deformación dinámica el ensayo más adecuado es el de columna de resonancia.

Estos u otros ensayos dinámicos deben ser especificados e interpretados por técnicos especialistas, ya que hoy aún están lejos de ser ensayos rutinarios normalizados.

2.11.9 Ensayos de rocas

Entre los ensayos más comunes específicos de mecánica de rocas quieren citarse:

- ◆ Determinación del peso específico y la absorción.
- ◆ Compresión simple (UNE 22950-1:1990) con bandas extensométricas.
- ◆ Ensayos de resistencia al corte de diaclasas.
- ◆ Ensayo de carga puntual (UNE 22950-5:1996).
- ◆ Determinación de la velocidad de propagación de ondas en testigos de roca.
- ◆ Ensayo triaxial en roca (UNE 22950-4:1990).
- ◆ Ensayos de permeabilidad en muestras cilíndricas huecas.
- ◆ Ensayos petrográficos con lámina delgada.
- ◆ Ensayos de durabilidad de las rocas (Slake Durability Test).
- ◆ Ensayo de Los Ángeles de desgaste de rocas (UNE EN 1097-2:1994).
- ◆ Ensayos de resistencia a los ciclos de humedad-sequedad (NLT 260).
- ◆ Ensayos de resistencia a los sulfatos sódico o magnésico.
- ◆ Ensayo de desgaste Deval (UNE EN 1097-1:1997).

2.11.10 Otros ensayos de laboratorio

Los ensayos mencionados en los apartados anteriores están muy lejos de ser una relación completa de los posibles. Existe una gran variedad de ensayos, menos comunes, que pueden ser de gran interés en el estudio de determinados problemas geotécnicos específicos.

Entre otros ensayos de suelos, se citan los siguientes:

- ◆ CBR. Determinación de la capacidad portante para explanadas y capas de firmes.
- ◆ Determinación de la relación succión-humedad en procesos de humectación y secado de suelos.
- ◆ Determinación de la presión de hinchamiento y de la expansión libre de suelos expansivos.
- ◆ Ensayos de dispersabilidad (o dispersividad) mediante análisis químico de los cationes del agua de adsorción de arcillas. Ensayos de dispersabilidad “pin-hole”. Ensayo de dispersión mediante doble densímetro.
- ◆ Ensayos de compresión brasileños (medida indirecta de la resistencia a tracción).
- ◆ Ensayos de molinete (vane test) y penetrómetro en laboratorio.
- ◆ Ensayos de compresión en la célula Rowe: edómetro de 25 cm (10”) de diámetro.

Cada vez con mayor frecuencia se realizan ensayos de laboratorio especiales (muestras de gran tamaño, prototipos ensayados en máquinas centrífugas, modelos reducidos, etc.) que son de gran interés pero que se escapan del ámbito de los problemas considerados en esta ROM.

2.12 INTENSIDAD DEL RECONOCIMIENTO GEOTÉCNICO

El número de sondeos mecánicos que conviene realizar, su ubicación y su longitud, la extensión de los reconocimientos geofísicos, el número de ensayos “in situ” (penetrómetros y ensayos en sondeos), el número de muestras que deben tomarse y los ensayos a realizar con ellas, así como cualquier otro elemento que defina el reconocimiento geotécnico necesario han de decidirse en función de los siguientes factores:

- ◆ *Condiciones geotécnicas*

El terreno sobre el que ha de construirse la obra puede presentar condiciones más o menos favorables respecto a la obra en cuestión. Se entiende que las condiciones son favorables cuando no son de temer problemas de rotura del terreno (falta de estabilidad o fallos de capacidad portante). Además, los problemas que puedan plantearse son comunes, han sido resueltos en ocasiones anteriores con facilidad y se dispone de experiencia contrastada para definir las formas de cimentación adecuada en este tipo de terreno.

Las condiciones geotécnicas deben considerarse desfavorables cuando se espera que las características del terreno resulten ser claramente críticas para el proyecto en cuestión habida cuenta de la solución estructural adoptada o cuando la obra a realizar requiere la utilización de técnicas o procedimientos poco usuales y sobre los que existe poca experiencia.

Uno de los aspectos que pueden conducir a unas condiciones geotécnicas desfavorables es la heterogeneidad del terreno. Sería el caso de aquellos terrenos que puedan ofrecer características claramente diferentes entre unos puntos y otros o presentar fallos locales donde las características resistentes puedan ser notablemente deficientes.

Antes de decidir la intensidad de los reconocimientos debe hacerse una estimación explícita acerca de las condiciones esperadas y calificar si éstas son *favorables*, *normales* o *desfavorables*.

◆ *Carácter de la obra*

La intensidad de los reconocimientos geotécnicos debe fijarse tras conocer el carácter de la obra. El carácter de la obra queda definido en la ROM 0.0. Allí se describe el procedimiento adecuado para obtener los índices IRE e ISA.

El índice IRE (Índice de Repercusión Económica) trata de medir las consecuencias económicas que tendría un fallo último de la obra.

El índice ISA (Índice de Repercusión Social y Ambiental) trata de medir en términos no económicos el efecto sobre vidas humanas, medio ambiente y, en general, impacto social que implicaría la ruina de la obra.

En función de estos índices y al objeto de decidir la intensidad de los reconocimientos y otros aspectos del proyecto geotécnico, pueden definirse las tres categorías A, B y C, según la tabla siguiente:

Tabla 2.12.1. Categoría de las obras según los índices IRE e ISA, a los efectos de la definición de la intensidad de los reconocimientos geotécnicos

ISA \ IRE	Bajo ≤ 5	Medio 5 a 20	Alto > 20
No significativo < 5	C	B	A
Bajo 5 a 19	B	B	A
Alto y muy alto ≥ 20	A	A	A

Comentario: La tabla 4.6 de la ROM 0.0 indica unos caracteres de obra que, a efectos de los reconocimientos geotécnicos, se pueden agrupar en tres categorías, de acuerdo con la siguiente correlación:

<u>Categoría</u>	<u>Carácter</u>
C	$r_1 s_1$
B	$r_2 s_1, r_2 s_2$ y $r_1 s_2$
A	resto

Esta misma agrupación será válida también para decidir sobre el tipo de cálculos u operaciones de comprobación de proyecto.

Los procedimientos de análisis de los problemas geotécnicos pueden agruparse en dos tipos o clases.

Clase 1. Procedimientos basados en información estadística de tipo general que permiten establecer los requisitos de seguridad mediante coeficientes de seguridad global o coeficientes parciales. Son los métodos de Nivel I relacionados en la ROM 0.0.

Clase 2. Procedimientos que requieren la utilización expresa de información estadística local y específica que debe definirse en el informe geotécnico. Son los métodos del Nivel II y Nivel III descritos en la ROM 0.0.

En todas las obras habrán de realizarse después comprobaciones de la seguridad basadas en procedimiento de Clase 1, pero en las obras de categoría A habrán de utilizarse, además, procedimientos de verificación de la seguridad de la Clase 2 y por eso, cuando la categoría sea «A», será necesario determinar, no sólo las características geotécnicas del terreno mediante valores adecuados de los datos correspondientes, sino también mediante parámetros adicionales que representen la variabilidad de los mismos. En estos casos, además de considerarse los aspectos que se indican en los distintos apartados de esta Parte 2, se tendrá en cuenta específicamente lo indicado en el apartado 2.14.

2.12.1 Tipos de reconocimiento

A efectos de establecer los criterios que pudieran ayudar al ingeniero a decidir sobre la intensidad de los reconocimientos más adecuados, se definen los tres tipos básicos siguientes: *detallados*, *reducidos* y *mínimos*.

Aunque más adelante se precisará mejor el alcance de un reconocimiento geotécnico mínimo, se avanza aquí que su objetivo es establecer las líneas generales de la estructura del terreno sin llegar a caracterizarlo con detalle.

En el otro extremo, un reconocimiento geotécnico detallado es aquél que investiga la estructura del terreno y sus características de manera tal que pueda conocerse, con suficiente precisión, los datos geotécnicos necesarios para cualquier punto de interés afectado por la obra.

El tipo de reconocimiento que se recomienda en cada caso, cuando se trata de realizar el informe geotécnico de un Proyecto de Construcción de una solución previamente estudiada, es el que se indica en la tabla 2.12.2.

Tabla 2.12.2. Tipo de reconocimiento recomendado para un proyecto constructivo

Categoría de la obra	Condiciones geotécnicas		
	Desfavorables	Normales	Favorables
A	Detallado	Detallado	Detallado
B	Detallado	Reducido	Reducido
C	Detallado	Reducido	Mínimo

El Informe Geotécnico Preliminar debe haber analizado previamente la situación correspondiente y haber identificado los objetivos de los reconocimientos de manera que el número de sondeos y su situación estén ya bastante condicionados por la geometría prevista de las obras a realizar y por la información preexistente.

2.12.2 Número de puntos de investigación en los reconocimientos detallados

El terreno debe explorarse normalmente mediante sondeos mecánicos que permitan extraer muestras y testigos con los que después se realizan los ensayos oportunos. También pueden realizarse ensayos de penetración continua en determinados puntos que permiten conocer la resistencia a la hinca y, conociendo el tipo de terreno, interpretar debidamente los resultados.

La ejecución de sondeos debe seguirse con detalle, conociendo los resultados primeros (columnas litológicas) cuanto antes para confirmar las profundidades y las ubicaciones de los sondeos posteriores. En general, es una buena estrategia explorar con sondeos espaciados las distintas zonas de la obra y después intercalar otros sondeos. El orden de ejecución de las prospecciones debe figurar de forma expresa en los planes de reconocimiento.

La realización de reconocimientos geofísicos en zonas marítimas o portuarias es una tarea prácticamente ineludible, pues suministra gran cantidad de información con un coste moderado. Las campañas de geofísica permitirán obtener una primera apreciación muy útil para programar la ubicación de los sondeos. Puede ser conveniente completar los reconocimientos geofísicos después de realizar los sondeos para ampliar el conocimiento de algunos detalles.

Los ensayos de geofísica sísmica permiten afianzar las posibles interpolaciones de la naturaleza del terreno que existe entre distintos sondeos en la dirección del extendimiento. Normalmente, deben realizarse extendimientos a lo largo de las alineaciones donde se ubiquen los puntos de reconocimiento (sondeos o ensayos de penetración).

En aquellos terrenos en los que sea posible realizar ensayos de penetración continuos, el número de sondeos mecánicos a realizar puede resultar notablemente reducido, siempre que la naturaleza del terreno atravesado quede claramente determinada por interpolación entre sondeos próximos o por algún otro procedimiento.

A título orientativo, se dan las recomendaciones que siguen para algunos casos típicos donde se supone que el reconocimiento geotécnico está destinado al proyecto de construcción de una solución cuya geometría ha sido previamente definida y que el terreno es poco conocido, pero se espera uniforme, esto es, sin variaciones locales que puedan afectar notablemente a la obra.

Si el objeto del trabajo es la realización de un estudio previo de soluciones o de viabilidad de una determinada obra, puede ocurrir, tal como se dice en el comentario del apartado 2.4, que no sea necesario hacer más sondeos de reconocimiento geotécnico.

Si el terreno es bien conocido mediante sondeos previos y los ensayos correspondientes, el número de sondeos a realizar puede reducirse en tanto en cuanto el lugar donde se ejecutaron coincida con los puntos de interés de la campaña que se necesita.

Para las situaciones de terreno poco homogéneas no se dan recomendaciones específicas sobre el número mínimo de sondeos de reconocimiento. El número adicional de sondeos a realizar en esos casos dependerá de cuál sea la singularidad que resta homogeneidad al terreno (fallas de gran amplitud en superficie, zonas de alteración irregulares, cauces próximos, cavidades de carstificación, depósitos de suelos erráticos y cuyas propiedades influyen notablemente en el proyecto, etc.). En términos generales, si al realizar un determinado sondeo se encuentra un terreno sensiblemente diferente del que se podría suponer por interpolación entre sondeos próximos, de manera que tales diferencias podrían inducir cambios inaceptables en las obras proyectadas, entonces debe concluirse que el reconocimiento mediante sondeos es aún escaso. En obras de importancia puede ser recomendable llegar hasta espaciamientos de sondeos inferiores a 5 m si las condiciones son, además de no homogéneas, desfavorables.

Cuando el grado de conocimiento necesario del terreno llegue a ser tal que requiera espaciamientos tan pequeños como el último indicado, se debe reconsiderar la tipología de la solución proyectada de manera que sea menos sensible a las variaciones locales de la naturaleza del terreno.

I. OBRAS DE GRAN EXTENSIÓN

En general los puntos de reconocimiento se dispondrán a lo largo de alineaciones, de manera que después sea más sencillo realizar perfiles geotécnicos según las direcciones de más interés.

Como planificación general se recomienda establecer esos puntos en una malla aproximadamente cuadrada en planta y con espaciamiento máximo de unos 30 m. Si la información preliminar indica que la variación de características del terreno es más pronunciada en una determinada dirección (perpendicular a la costa, por ejemplo) y más suave en otra sensiblemente ortogonal, la malla de puntos de reconocimiento más adecuada sería rectangular, haciendo los reconocimientos más próximos entre sí en el sentido de la máxima variación y más separados en la dirección ortogonal.

Si las condiciones del terreno son claramente desfavorables puede que sea necesario reducir el espaciamiento hasta unos 20 m.

En cualquier caso se realizarán al menos tres sondeos no alineados en planta.

Además de estos reconocimientos destinados al conocimiento geotécnico general de áreas de gran extensión, serán necesarios otros sondeos específicos para obtener información concreta de las condiciones del subsuelo en cada parte de la obra.

2. ESTRUCTURAS CONCENTRADAS

Estas estructuras, cuyo caso típico sería un dique seco de carena, deben tener reconocimientos específicos mediante puntos de reconocimiento separados entre sí del orden de 25 m.

Es recomendable disponer sondeos adicionales en lugares de especial interés, tales como pozos de achique, apoyo de mayores cargas, galerías profundas, etc.

3. ESTRUCTURAS LINEALES

Estas estructuras, cuyo caso típico sería un muelle de gran calado, deben tener puntos de reconocimiento geotécnico dispuestos en tres alineaciones paralelas a la línea de costa, separadas entre sí una distancia similar a la altura de la obra y con la línea central discurriendo, aproximadamente, por la zona de mayor carga. Para calados menores puede bastar con una o dos alineaciones. Ver Fig. 2.12.1.

El espaciamiento entre esos puntos debe ser del orden de 40 m, quedando más o menos separados según sean más o menos favorables las condiciones del terreno.

4. EDIFICIOS O INSTALACIONES LIGERAS

Se entiende por tales aquéllos que ocupan extensiones superiores a 200 m² y no requieren la aplicación de grandes cargas concentradas.

Se recomienda realizar al menos un sondeo por cada 400 m² de área ocupada.

El mínimo número de sondeos será cuatro, salvo que el área a ocupar sea menor de 400 m², en cuyo caso el número de sondeos podría ser tres.

Cuando el número de sondeos sea superior a tres, alguno de ellos puede sustituirse por un reconocimiento alternativo (ensayo de penetración continuo, por ejemplo).

5. TALUDES DE EXCAVACIÓN O RELLENO

Antes de realizar los sondeos se debe decidir la situación de los perfiles de análisis en la dirección de los posibles deslizamientos. Estos perfiles estarán separados entre sí unos 50 m.

En cada perfil se realizará un mínimo de un sondeo en obras pequeñas o de hasta tres sondeos si la obra es de mayores dimensiones. Ver Fig. 2.12.1.

6. DRAGADOS

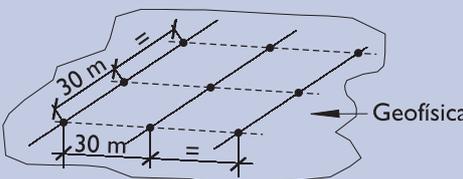
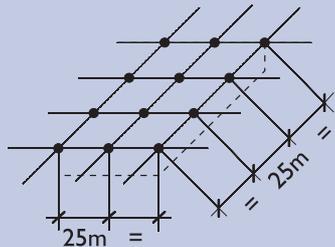
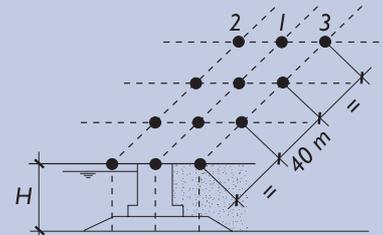
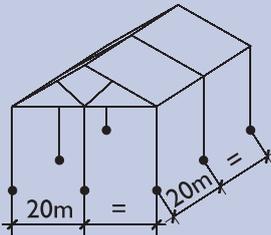
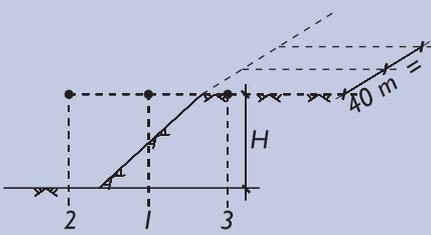
Para el proyecto de las obras de dragado se deben realizar investigaciones según alineaciones verticales o puntos de reconocimiento dispuestos en planta tal como se indica en el punto 1.- “Obras de gran extensión”, y con mayor intensidad en los bordes de dragado, tal como se indica en el punto 5.- “Talu-des de excavación o relleno”.

En el caso de los dragados, además de los parámetros geotécnicos que pueden ser necesarios para ejecutar la excavación (ver apartado 4.9), puede ser necesario investigar otros parámetros relacionados con el impacto ambiental. Este aspecto puede requerir una campaña de reconocimiento específica.

El número de sondeos que se define inicialmente en una campaña de reconocimiento debe ser confirmado, ampliado o reducido si, a medida que se conoce el terreno, éste resulta más o menos homogéneo o favorable respecto a la estimación previa.

El número de sondeos puede reducirse si, a cambio, existe una campaña amplia de ensayos de penetración estática. Ver nota de pie en Fig. 2.12.1

Figura 2.12.1. Número de puntos recomendados en reconocimientos detallados.
(Para aclaraciones y complementos, ver texto)

Tipos de obra	Espaciamiento entre perfiles	Espaciamiento entre perfiles o puntos de perfil			Esquemas
Áreas de gran extensión. Ejemplo: Relleno soporte de un pavimento	30 m	30 m			
Estructuras concentradas. Ejemplo: Dique seco de carena	25 m	25 m			
Estructuras lineales. Ejemplo: Muelle	40 m	H (m)			
		≤ 10	10 a 15	> 15	
		1	2	3	
Edificaciones o instalaciones ligeras. Ejemplo: Almacén	20 m	20 m			
Taludes de excavación o relleno	40 m	H (m)			
		≤ 10	10 a 15	> 15	
		1	2	3	

Nota: En suelos blandos, los puntos de reconocimiento pueden investigarse mediante ensayos de penetración estática, aunque se recomienda que al menos la mitad de los puntos indicados se investiguen mediante sondeos mecánicos.

2.12.3 Reconocimientos reducidos y mínimos

Cuando se tenga constancia fehaciente de que las condiciones de cimentación no son desfavorables y cuando, además, la obra es de importancia limitada (clases B ó C antes mencionadas), el número de puntos de reconocimiento geotécnico que se recomienda es menor que el indicado en apartados precedentes

Los reconocimientos geotécnicos reducidos pueden realizarse explorando el terreno mediante perfiles de geofísica (sísmica) y mediante sondeos ejecutados según alineaciones y/o perfiles más espaciados

que los indicados en el apartado anterior pero nunca con espaciamentos mayores que los propuestos en la Tabla 2.12.3.

Excepcionalmente, en obras de escasa importancia (Clase C) y en condiciones de terreno favorables, se recomienda realizar reconocimientos geotécnicos mínimos con el número mínimo de puntos de exploración indicados en la Tabla 2.12.3.

Tabla 2.12.3. Número de puntos de investigación en reconocimientos reducidos y mínimos

Tipo de obra	Tipos de reconocimiento	
	Reducidos	Mínimos
Áreas de gran extensión	mallá 50 × 50 m	mallá 75 × 75 m
Estructuras concentradas	mallá 50 × 50 m	mallá 75 × 75 m
Estructuras lineales	un punto cada 50 m	un punto cada 100 m
Edificios o instalaciones ligeras	mallá 25 × 25 m	mallá 40 × 40 m
Taludes de excavación o relleno	un punto cada 50 m	un punto cada 100 m

2.12.4 Número de ensayos de laboratorio

Para definir el número de ensayos de laboratorio es preciso clasificar, antes, los tipos de terreno existentes en el subsuelo. En términos generales, una formación particular (depósito de arenas, capa de arcilla, fondo rocoso, etc.) queda mínimamente definida en un determinado aspecto cuando al menos se hacen dos determinaciones en laboratorio de la propiedad que controla el aspecto en cuestión.

En general, se recomienda tomar al menos dos muestras en cada formación diferente de las que atravesase un determinado sondeo y no espaciar, dentro de un sondeo, la toma de muestras más allá de 5 m aunque la formación atravesada sea, aparentemente, muy homogénea.

Todas las muestras tomadas en los reconocimientos deben ser sometidas a los ensayos de identificación más sencillos (granulometrías y plasticidad si es el caso); sólo algunas (una de cada cinco y dos como mínimo de cada formación) deben ser sometidas a ensayos de identificación más completos (peso específico de partículas, análisis químicos y densidades extremas de arenas).

Todas las muestras inalteradas deben ser ensayadas para conocer su densidad seca y humedad natural.

Es recomendable que en uno de los sondeos se realice la toma de muestras con mayor intensidad y que se ensayen los terrenos con más profusión de manera que, al menos en una vertical, el terreno quede definido con mayor detalle.

Conocidos los resultados de los ensayos de identificación o antes si existe información suficiente, los terrenos atravesados deben clasificarse en grupos o niveles para los que se esperan características de resistencia, deformabilidad y permeabilidad similares.

Cuando se requiere que la similaridad de características sea importante, puede ocurrir que se llegue a definir un número de formaciones o niveles excesivo conduciendo a modelos del terreno difícilmente manejable con los métodos de cálculo que más adelante se comentarán. La clasificación de los distintos terrenos en grupos homogéneos es una tarea trascendente y difícil de realizar. El ingeniero siempre ha de buscar un punto óptimo en cuanto a la complejidad del esquema del terreno que es conveniente preparar para decidir los ensayos de resistencia y permeabilidad que después conviene realizar con muestras procedentes de una determinada formación.

Dependiendo del tipo de problema a analizar, deben predominar los ensayos de resistencia (triaxiales y compresiones simples para problemas de hundimiento o estabilidad) o los de deformación (edómetros en suelos cohesivos para estimación de asentos y tiempos de consolidación) o los de permeabilidad (ensayos de permeabilidad en permeámetro o ensayos de bombeo para problemas de achique).

Los ensayos de resistencia y deformabilidad (compresión simple, corte directo, triaxiales y edómetros) deben realizarse únicamente con muestras poco alteradas o inalteradas.

El número de ensayos de resistencia (tanto con drenaje como sin drenaje en arcillas) que conviene realizar con muestras de cada formación debe ser, como mínimo, de 5 Uds en los reconocimientos detallados y 3 Uds en los reconocimientos reducidos. Si es de interés este aspecto en algún reconocimiento somero, se podrán realizar 2 Uds de estos ensayos. Esas mismas cantidades aplican a los ensayos edométricos en suelos blandos y a los ensayos de permeabilidad, cuando éstos tengan interés.

En cualquier caso, se recomienda que la definición precisa de los ensayos de laboratorio a realizar se haga después de conocer el resultado de los primeros sondeos y que tal definición se concluya una vez estén disponibles los resultados de todos los trabajos de campo.

2.13 INFORME GEOTÉCNICO

A la hora de redactar el Informe Geotécnico correspondiente a un determinado propósito (estudio previo, proyecto, etc.) deben existir dos documentos previos, que son:

- ◆ Informe geotécnico preliminar.
- ◆ Plan de reconocimientos geotécnicos.

En obras de escasa importancia, donde no son de prever problemas geotécnicos y donde existe abundante información previa contrastada con los sondeos pertinentes realizados en la fase de estudio preliminar, puede que el segundo de los documentos citados no exista, que no hayan sido necesarios reconocimientos geotécnicos adicionales. En ese caso no será necesario redactar nuevos documentos y entonces el informe geotécnico preliminar será la única parte del Informe Geotécnico.

Normalmente, cuando se hayan hecho trabajos de reconocimiento adicionales, existirán ambos documentos, que se consideran parte integrante del Informe Geotécnico y que se pueden editar separadamente o integrados a modo de apéndices en la edición del Informe Geotécnico.

El Informe Geotécnico contendrá toda la información geotécnica disponible ordenándola en una Memoria principal y una serie de Anejos que faciliten su utilización posterior.

La información de detalle que debe figurar en Anejos dependerá de la amplitud de datos existentes. En las situaciones más usuales es recomendable ordenar la información de detalle en, al menos, dos Anejos según se indica en 2.13.1 y 2.13.2.

2.13.1 Anejo de trabajos de campo

Este Anejo contendrá la información relativa a:

- ◆ Situación detallada de los reconocimientos y fecha de ejecución.
- ◆ Columnas litológicas y fotografías de testigos de sondeos.
- ◆ Descripción de zanjas, calicatas y pozos y sus fotografías.

- ◆ Definición de la localización de las muestras tomadas y observaciones sobre el procedimiento utilizado para tomarlas y transportarlas.
- ◆ Resultados detallados de cada uno de los ensayos «in situ».
- ◆ Datos de observación del nivel freático.
- ◆ Observaciones detalladas del técnico responsable de los trabajos de campo.

2.13.2 Anejo de ensayos de laboratorio

Este Anejo contendrá la información de detalle correspondiente a:

- ◆ Relación de muestras con indicación de su procedencia y su naturaleza (alterada, inalterada, en sacos, tubos portatestigos, testigos parafinados, muestras en bloque, etc.).
- ◆ Informe sobre la apertura de muestras y descripción de su estado. Es recomendable incluir fotografías realizadas en el momento de la apertura.
- ◆ Relación detallada de ensayos realizados.
- ◆ Resultados de los ensayos debidamente ordenados.

Estos y otros posibles Anejos (la cartografía geológica, los reconocimientos geofísicos, etc. pueden constituir otros Anejos) contendrán toda la información básica, de manera que la Memoria pueda escribirse y leerse claramente.

2.13.3 Memoria

La Memoria del Informe Geotécnico tratará al menos los aspectos siguientes:

- ◆ Propósito del informe geotécnico.
- ◆ Descripción de la obra, proyecto o características del problema que motivan su redacción. En caso de tratarse de una obra a realizar, incluirá en su descripción la situación y geometría de la obra, las tipologías estructurales previstas, los materiales a emplear y una estimación de las cargas principales.
- ◆ Trabajos de campo. Con referencias cronológicas de los distintos trabajos de campo y descripción de los equipos empleados y personal que los ha realizado.
- ◆ Trabajos de laboratorio. Describiendo los procedimientos de ensayos empleados, los tipos de muestras analizadas y la cantidad de ensayos de cada tipo.
- ◆ Descripción de las condiciones geológico-geotécnicas del emplazamiento. Se incluirá en este apartado la historia geológica y geomorfológica del lugar (se recomienda la ayuda de fotos aéreas donde sea aplicable), la cartografía geológica, la estructura del subsuelo, los tipos de suelos o rocas que pueden intervenir en el problema en estudio, la experiencia geotécnica local, la observación del nivel freático, etc. Esta descripción debe ser realizada con ayuda de mapas, planos, perfiles geotécnicos, fotografías y esquemas o dibujos suficientes para la clara exposición de todos los detalles de interés.
- ◆ Características geotécnicas del terreno. Hecha la clasificación de los distintos materiales reconocidos, se describirán, para cada uno de ellos, las características geotécnicas que se deducen de los ensayos de laboratorio y de los ensayos “in situ”. En términos generales, se tratará de establecer las causas de variación

de los distintos parámetros mediante gráficos, figuras y correlaciones. Son de particular interés los diagramas de variación de los distintos parámetros en profundidad.

- ◆ Consideraciones del técnico responsable del informe geotécnico relativas al grado de cumplimiento de los objetivos indicando, expresamente, los puntos en los que a su juicio sería necesario ampliar el reconocimiento.

Si tras la consideración de toda la información disponible resultasen aspectos dudosos inadmisibles, se deberá ampliar los reconocimientos y revisar el Informe Geotécnico o editar el complemento necesario.

2.14 RECONOCIMIENTOS GEOTÉCNICOS PARA OBRAS O PROYECTOS DE CATEGORÍA A

En las obras o proyectos de categoría A (ver Tabla 2.12.1 y su comentario) es recomendable realizar las verificaciones o comprobaciones de tipo geotécnico utilizando, además de los métodos basados en los coeficientes de seguridad, procedimientos probabilísticos de Nivel II y III para los cuales es necesaria una información local específica de la variabilidad de los parámetros del terreno. Para obtener este tipo de información, el ingeniero deberá programar los reconocimientos del terreno y analizar sus resultados de manera adecuada.

2.14.1 Identificación de diferentes terrenos

El primer paso necesario para la ordenación y el análisis de la información geotécnica es la identificación de los diferentes terrenos.

En primera instancia, deberían identificarse separadamente los rellenos artificiales que pudieran existir y distinguir los suelos cuaternarios de los materiales más antiguos.

Las rocas que se hallasen serán clasificadas atendiendo a su naturaleza y dentro de cada grupo habrán de diferenciarse niveles o tramos de acuerdo con su grado de fracturación y alteración.

Los suelos que pudieran existir habrán de clasificarse por tramos de características suficientemente homogéneas. Como norma general, será obligado considerar que dos suelos (o dos tramos o zonas del terreno) son diferentes cuando se da alguna de las siguientes circunstancias:

- a. La diferencia estimada del valor medio de la tangente del ángulo de rozamiento, $\tan \phi$, supera cierto umbral. Generalmente, diferencias del orden del 10% en el valor de $\tan \phi$ deben justificar la identificación de terrenos diferentes.
- b. En suelos cohesivos, dos formaciones deben considerarse diferentes cuando el valor medio de la relación que existe entre la resistencia al corte sin drenaje y la presión efectiva vertical (s_u / σ'_v) correspondiente a cada uno de ellos difiere en más de un 10%.

Para explorar estos dos valores clave (ϕ y s_u) se utilizarán, además de los datos específicos que se obtengan en la campaña de reconocimiento, correlaciones locales (obtenidas con datos de terrenos similares a los de la zona de estudio) con los parámetros de identificación y estado siguientes:

- ◆ Granulometría. Es especialmente interesante la correlación que existe entre el contenido de finos (tamiz 0,08 UNE) y el ángulo de rozamiento.
- ◆ Plasticidad. En particular es de interés la correlación del cociente s_u / σ'_v con el índice de plasticidad, IP, y la razón de sobreconsolidación, OCR.
- ◆ Densidad seca, humedad natural e índice de fluidez. Debe existir una correlación clara entre estos datos y el valor de la resistencia al corte sin drenaje en suelos cohesivos.

2.14.2 Parámetros geotécnicos comunes

Para cada tipo de terreno que se identifique deben describirse los parámetros geotécnicos de interés, que serán diferentes dependiendo del problema en estudio y del procedimiento de verificación que se utilice.

En general, para cualquier terreno y cualquiera que sea el problema en estudio y el procedimiento de análisis, se hará constar siempre los siguientes datos:

Datos esenciales (Identificación y estado)

- ◆ Densidad seca y humedad natural.
- ◆ Granulometría, en caso de suelos.
- ◆ Plasticidad de la fracción fina.
- ◆ Identificación petrográfica de las rocas.

Cuando se trate de rocas cuyo comportamiento pueda afectar a algún estado límite, será obligatorio, además, definir los siguientes parámetros:

Caracterización de rocas

- ◆ Descripción de las litoclasas y grado de alteración.
- ◆ Resistencia a compresión simple de la roca sana.
- ◆ Alguno de los valores siguientes relacionados con su deformabilidad.
 - Velocidad de propagación de ondas de presión y de corte (v_p y v_s).
 - Módulo presiométrico (o dilatométrico).

Cuando se trate de suelos que puedan jugar algún papel significativo en el comportamiento de la obra frente a Estados Límite Últimos será recomendable conocer:

Caracterización de suelos

- ◆ Identificación mineralógica y química de las partículas de los suelos.
- ◆ Resistencia al corte sin drenaje en suelos cohesivos, s_u .
- ◆ Resistencia al corte con drenaje. Parámetros del modelo de Mohr-Coulomb: c' ϕ' .
- ◆ Parámetros de deformación según alguno de los dos modelos siguientes:
 - Elástico: módulos de elasticidad y de Poisson, que pueden ser variables durante el proceso de carga.
 - Edométrico: consignando al menos los cinco datos siguientes:

- e_o = índice de poros inicial.
- p_c = presión de preconsolidación.
- C_c, C_s = índices de compresión y entumecimiento.
- c_v = coeficiente de consolidación.

Los datos de resistencia podrían ser sustituidos justificadamente por datos indirectos tales como:

- ◆ Índice N(SPT).
- ◆ Resistencia en ensayos de penetración estática (q_c y q_f).
- ◆ Presión límite en ensayos presiométricos.
- ◆ Ensayos de penetración dinámica continuos.

Los datos de deformabilidad podrían ser obtenidos indirectamente, también de forma justificada, mediante correlaciones conocidas aplicables al caso en cuestión.

2.14.3 Variabilidad de los parámetros geotécnicos

De cada parámetro geotécnico X , se definirá el valor más representativo que, en general, será una estimación del valor medio, X_m .

Para cada nivel o estrato o zona de suelo o roca que se haya diferenciado se indicará no sólo ese valor representativo, sino también el rango de variación esperado. Los límites del rango de variación posible del parámetro en cuestión deben establecerse de manera que sea muy poco probable (nominalmente del orden de uno entre mil) que el parámetro correspondiente quede fuera de dicho intervalo.

Para establecer ciertos modelos probabilísticos de la variabilidad de los datos del terreno es preciso que, como mínimo, se incluya un valor suficientemente preciso del coeficiente de variación ⁽¹²⁾.

El coeficiente de variación de los parámetros del terreno depende de la amplitud de la zona en cuestión. No resultará el mismo coeficiente de variación cuando se trata del entorno de la punta de un pilote que cuando se trata del conjunto del terreno implicado en la estabilidad global de la obra. Los coeficientes de variación que se indiquen en el informe geotécnico deben adscribirse a zonas concretas del terreno.

Los coeficientes de variación han de asignarse únicamente a los parámetros geotécnicos que hayan de usarse directamente en los cálculos. No es necesario hacerlo para aquellos parámetros auxiliares tales como son los datos granulométricos, plasticidad, mineralogía, etc.

El coeficiente de variación debe determinarse mediante estudios estadísticos de los resultados. Como información genérica se indica el siguiente valor aproximado del coeficiente de variación:

$$v = \frac{\text{Valor máximo estimado} - \text{Valor mínimo estimado}}{n \times \text{Valor medio}}$$

donde “n” es un número adimensional que puede oscilar, según los casos, dentro del rango de 4 a 6. Ver más detalles en el apartado 3.3.10.

(12) Para una muestra estadística que contiene «n» datos X_i , las dos determinaciones más elementales que pueden hacerse son las que conducen al valor medio X_m y a la desviación estándar σ_x definidas por las expresiones siguientes:

$$X_m = \frac{1}{n} \sum_1^n X_i$$

$$\sigma_x = \left\{ \frac{1}{n-1} \sum_1^n (X_i - X_m)^2 \right\}^{1/2}$$

Se entiende como coeficiente de variación, v , el cociente definido mediante la expresión siguiente:

$$v = \frac{\sigma_x}{X_m}$$

2.14.4 Funciones probabilísticas recomendados

Para realizar cálculos con métodos de la Clase 2 (éstos son los de Nivel II o Nivel III: Ver apartado 2.12) es necesario definir los parámetros geotécnicos que entren en los cálculos mediante una función probabilista.

Dependiendo del tipo de parámetro, esa función puede ser de tipo diferente. El ingeniero deberá investigar, en cada caso concreto, cuál es el tipo de distribución que representa mejor la variabilidad observada.

En general, aunque las distribuciones normales sean fáciles de utilizar, se huirá de ellas pues la forma de sus colas está lejos de representar, siquiera aproximadamente, la variabilidad natural de la mayoría de los parámetros geotécnicos. Y la forma de las colas es esencial en los cálculos probabilistas, particularmente los que corresponden a obras de ISA alto.

Una ley sencilla, que se utiliza con relativa frecuencia, es la log-normal que queda definida por el valor medio, λ , y la desviación estándar, ζ , del logaritmo del parámetro, X , en cuestión, mediante las expresiones siguientes:

$$\begin{aligned} \text{Valor medio del logaritmo} & \quad \lambda = \ln X_m - \frac{1}{2} \zeta^2 \\ \text{Desviación estándar del logaritmo} & \quad \zeta = \sqrt{\ln(1 + v^2)} \end{aligned}$$

donde X_m y v son el valor medio de X y su coeficiente de variación, según se define en 2.14.3.

Cuando exista información específica, el ingeniero debe proponer leyes de variación más acordes con la variabilidad de cada parámetro.

En la Tabla 2.14.1 se indican a título orientativo valores típicos de algunos coeficientes de variación. También se indica la unidad de medida usual de cada parámetro.

Tabla 2.14.1. Unidades de referencia recomendadas y valores aproximados del coeficiente de variación de los parámetros geotécnicos para terrenos normalmente homogéneos

Parámetro	Símbolo	Ud. de referencia recomendada	Coefficiente de variación típica
Pesos específicos	γ_d	kN/m ³	0,05
Humedades	w	%	0,10
Ángulo de rozamiento (tangente)	tg ϕ	Adimensional	0,07
Cohesión	c	kPa	0,10
Resistencia al corte sin drenaje	c_u, s_u	kPa	0,15
Resistencia a compresión simple, suelos	q_u	MPa	0,15
Resistencia a compresión simple, rocas	R_c	MPa	0,20
Resistencia por punta de ensayos de penetración estática	q_c	MPa	0,15
Presión límite, ensayos presiométricos	p_l	MPa	0,15
Índice N (SPT)	N	Adimensional	0,15
Módulo de elasticidad	E	MPa	0,30
Módulo de Poisson	ν	Adimensional	0,05
Presión de preconsolidación	p_c	MPa	0,15
Índices de compresión y entumecimiento	C_c, C_s	Adimensional	0,10
Coefficiente de consolidación	c_v	cm ² /s	0,50
Coefficiente de permeabilidad (Darcy)	k	cm/s	*

2.15 COSTE DE LOS RECONOCIMIENTOS DEL TERRENO

Las consecuencias negativas que se pueden presentar durante la construcción de las obras como secuela de un mal conocimiento del terreno son importantes en algunas ocasiones. Pueden darse situaciones de incrementos de coste y/o de plazo difícilmente asumibles e incluso de ruina de la obra si el problema no se detecta a tiempo.

El hecho de que en el Programa ROM se admitan probabilidades de fallo explícitas de valor considerable no debe amparar, ni mucho menos, fallos ocasionados por causa de desconocimiento del terreno. Esas probabilidades de fallo serán siempre controladas y debidas a cualquier otra causa. Nunca a un conocimiento del terreno de calidad inferior al indicado en esta Parte 2 de la ROM 0.5.

El coste de los reconocimientos debe compararse con el beneficio que reporta. Los costes usuales de las campañas de reconocimiento geotécnico suponen una fracción apreciable de la inversión total (construcción de la obra objeto del reconocimiento). Esa proporción es variable y puede oscilar entre el 0,5% para reconocimientos en obras de atraque en terrenos buenos, hasta más del 3% en obras de abrigo donde los reconocimientos, con ayuda de medios flotantes, son muy costosos. Estos costes deben considerarse como parte de la inversión; en realidad es una partida más de las destinadas a la realización de la obra en cuestión.

APÉNDICE I. FÓRMULAS PARA LA INTERPRETACIÓN DE ENSAYOS DE PERMEABILIDAD EN POZOS Y SONDEOS

AI.1 Interpretación de ensayos de permeabilidad en sondeos

AI.1.1 Ensayos Lefranc

Los ensayos de permeabilidad más frecuentes en sondeos consisten en el control del caudal del agua introducido en el terreno bajo ciertas condiciones de geometría de la zona de contacto del agua libre con el terreno circundante y ciertas condiciones de carga hidráulica.

En todos estos ensayos, de carácter tridimensional, el caudal viene dado por una expresión del tipo:

$$Q = \Delta\phi \cdot K \cdot n$$

donde:

- Q = Caudal de agua necesario para mantener el sondeo con nivel de agua constante.
- $\Delta\phi$ = Diferencia de potencial entre el interior y el exterior del sondeo.
- K = Permeabilidad que se busca.
- n = Coeficiente de forma.

El coeficiente “n” tiene dimensiones de longitud.

Los valores del coeficiente “n” para algunos casos típicos son los indicados en la Fig.AI.1.

AI.1.2 Ensayos Lugeon

Los ensayos Lugeon son exclusivos de rocas duras en las que la permeabilidad se mide en unidades Lugeon, UL. Una unidad Lugeon es aquella que permite el paso de un caudal de 1 litro/minuto por cada ml de sondeo cuando la presión de ensayo es 10 bares. Sólo cierto tipo de rocas muy resistentes admiten tan altas presiones sin fracturarse.

Para estimar la permeabilidad equivalente en medio poroso, se puede usar la correlación teórica:

$$1 \text{ UL} \Leftrightarrow 1,3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$$

aunque tal correlación puede ser dispersa y debe comprobarse si la aplicación específica en que se pretende utilizar es sensible a tal dispersión.

A1.1.3 Ensayos con carga variable

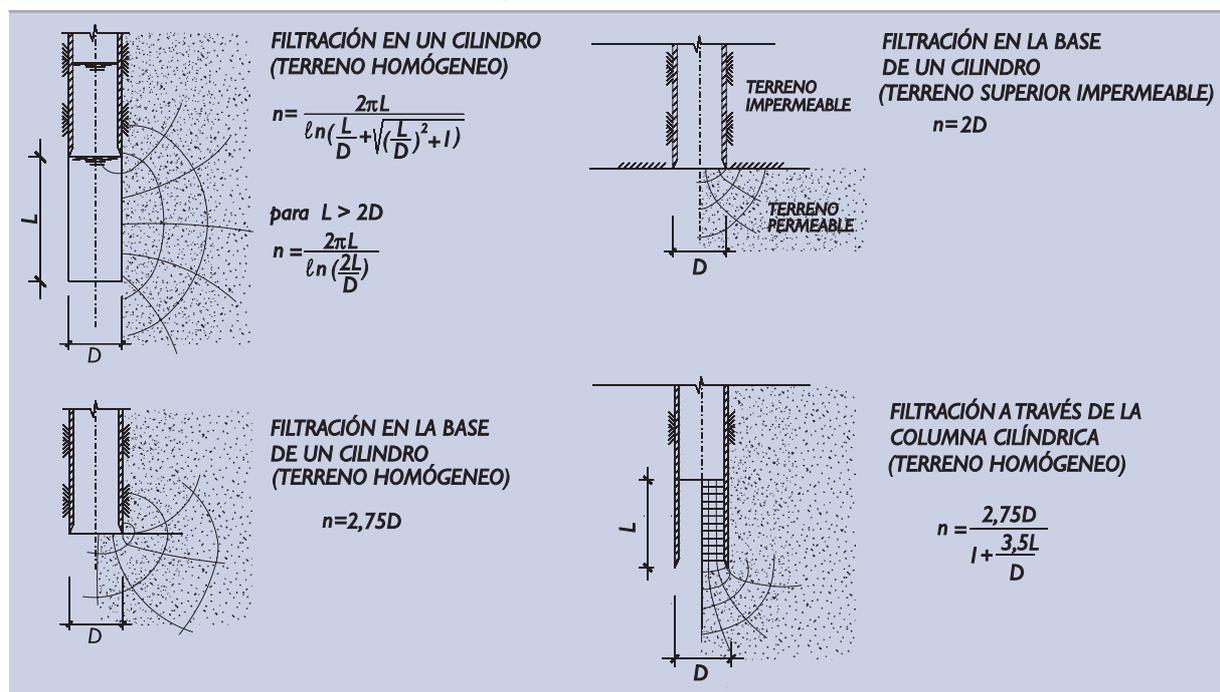
Los ensayos en sondeos con carga variable en los que se controla la variación de alturas de agua sobre el nivel freático ΔH_1 y ΔH_2 que corresponden a dos tiempos t_1 y t_2 se pueden interpretar con la expresión:

$$K = \frac{\pi D_o^2}{4(t_2 - t_1)} \frac{1}{n} \ln \left(\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \right)$$

donde:

- D_o = Diámetro del interior de la entubación en la zona donde oscila el nivel de agua.
 t_1, t_2 = Tiempos correspondientes a las medidas de ΔH_1 y ΔH_2 .
 n = Coeficiente de forma de la zona de contacto del agua libre del interior del sondeo y el terreno. Ver Fig. A1.1.
 $\Delta H_1, \Delta H_2$ = Altura de la lámina libre del agua dentro del sondeo respecto al nivel freático en los tiempos t_1 y t_2 .

Figura A1.1. Coeficientes de forma en el ensayo Lefranc



Los detalles de ejecución de estos ensayos tales como la limpieza del fondo del sondeo, la estabilidad de sus paredes, la obturación de la zona revestida del sondeo, etc. tienen o pueden tener repercusiones muy altas en los resultados. Por eso, la determinación de la permeabilidad es siempre una tarea de resultados poco precisos.

A1.2 Interpretación de ensayos de bombeo

Para el estudio de la permeabilidad del terreno mediante ensayos de bombeo o para proyectar el rebajamiento del nivel freático con pozos, conviene la asistencia técnica de especialistas competentes en la hidráulica de pozos.

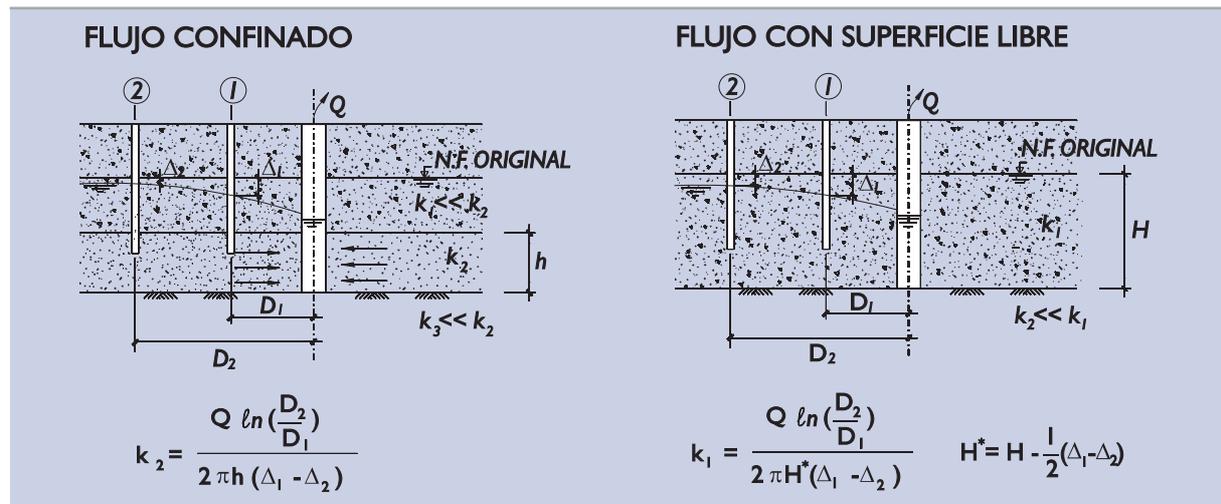
Para resolver temas sencillos de menor trascendencia se traen a esta ROM las fórmulas elementales de uso más extendido.

A1.2.1 Ensayos en régimen permanente

No es frecuente ni recomendable realizar ensayos de bombeo hasta alcanzar el régimen permanente, ya que son difíciles de interpretar; en los resultados influyen las condiciones de borde lejanas, generalmente mal conocidas y además pueden requerir tiempos de ensayo largos.

En cualquier caso, si se miden los descensos del nivel freático en al menos dos puntos fuera del pozo y se conoce el caudal permanente que los causa, se puede estimar la permeabilidad con las expresiones que se indican en la Fig. A1.2, según se trate de un acuífero confinado o un acuífero libre y siempre que el pozo alcance un estrato profundo impermeable. En la literatura técnica especializada existen soluciones para otras configuraciones más complejas.

Figura A1.2. Ensayos de bombeo en régimen permanente



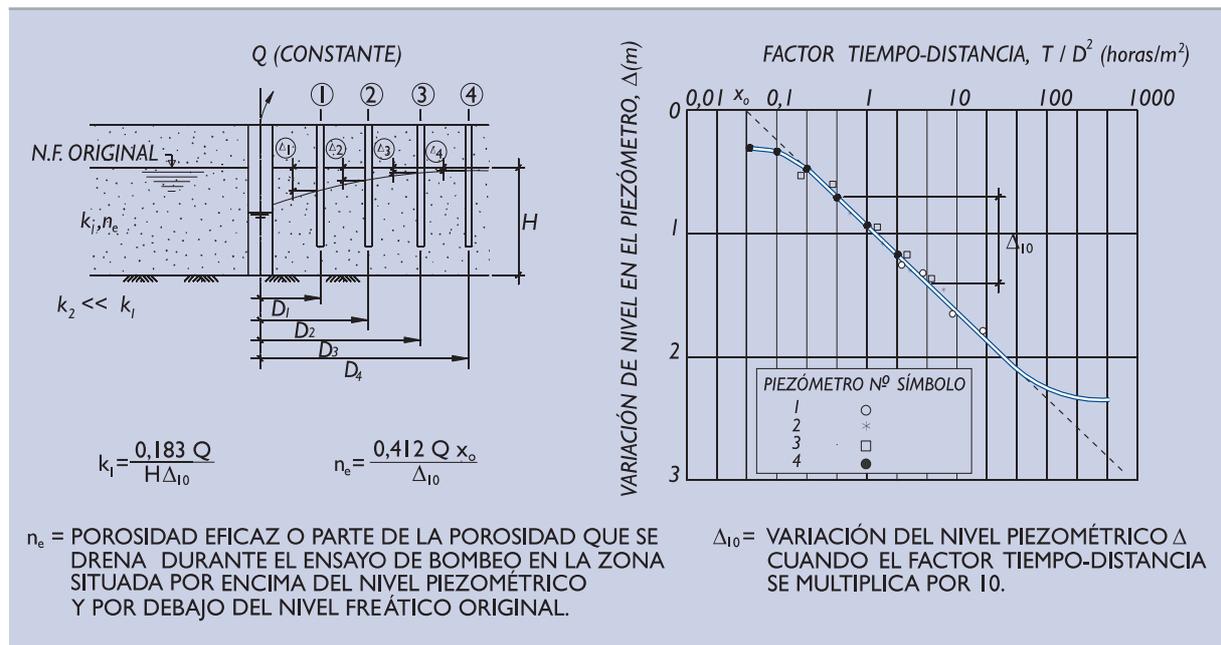
A1.2.2. Ensayos en régimen transitorio

Es práctica normal recomendable hacer los ensayos de bombeo transitorios de manera que se controle, fuera del pozo, la evolución del descenso del nivel freático en función del tiempo, cuando se extrae el caudal constante Q .

La práctica demuestra que en buen número de situaciones existe una forma de representar los descensos del nivel freático que permite una interpretación posterior sencilla. Tal sistema se ilustra en la Fig. A1.3.

En el eje de abscisas se representa, en una escala logarítmica, el factor:

$$x = \frac{T}{D^2}$$

Figura A1.3. Esquema del ensayo de bombeo en régimen transitorio

donde:

- T = Tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo.
 D = Distancia del punto considerado al eje del pozo.

En el eje de ordenadas y hacia abajo, se representan los descensos registrados, en escala natural.

La recta que mejor ajuste los datos de los distintos tiempos y piezómetros permite definir una abscisa teórica x_0 y una pendiente, Δ_{10} , que están relacionadas con la porosidad eficaz del medio y con la permeabilidad, según se indica en dicha figura.

A1.2.3 Inversión del ensayo de bombeo

Es frecuente y recomendable controlar los ascensos de los pozos una vez detenido el bombeo. La interpretación de estos ascensos permite estimar unos nuevos datos en cada piezómetro "i" y para cada instante "T" contado a partir del momento en que se detiene el bombeo del caudal Q . Esa estimación puede hacerse restando al descenso que se mide, el descenso que habría habido en caso de continuar el bombeo. Este último puede obtenerse prolongando a sentimiento los registros de observación de descensos obtenidos durante el bombeo, o mediante el uso de la correlación del gráfico logarítmico antes mencionado, para extrapolar datos a tiempos mayores.

La nueva colección de datos permite una nueva evaluación de K y n_e con las mismas fórmulas antes indicadas, ya que el cese del bombeo se puede interpretar como la superposición de un caudal $-Q$ al estado anterior de bombeo de un caudal Q .

A1.2.4 Niveles dentro del pozo

En cualquier ensayo de bombeo no se considera adecuado utilizar, como dato de «nivel piezométrico», el nivel del agua dentro del pozo, ya que existe, en general, una zona de surgencia libre (diferencia de cota entre el N.F. y el nivel de agua en el interior del pozo) de difícil control.

Capítulo III
Crterios Geotécnicos



Índice Capítulo III

CAPÍTULO III. CRITERIOS GEOTÉCNICOS

3.1. ASPECTOS GENERALES	129
3.2. CRITERIOS DE SEGURIDAD, SERVICIO Y EXPLOTACIÓN	129
3.2.1. Fiabilidad frente a los Estados Límite Últimos	130
3.2.2. Funcionalidad frente a Estados Límite de Servicio	132
3.2.3. Operatividad frente a los Estados Límite de Parada Operativa	133
3.3. CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS	133
3.3.1. Estados Límite Últimos (ELU)	133
3.3.2. Estados Límite de Servicio (ELS)	134
3.3.3. Estados Límite de Parada Operativa (ELO)	135
3.3.4. Métodos de cálculo	135
3.3.5. Definición de los Estados o situaciones de proyecto	139
3.3.5.1. Definición de los parámetros geométricos	139
3.3.5.2. Definición de las propiedades del terreno	141
3.3.5.3. Definición de las acciones	142
3.3.5.4. Definición de las combinaciones de acciones y demás factores de proyecto	143
3.3.5.5. Consideración de Estados o situaciones de corta duración	147
3.3.6. Coeficientes de ponderación parciales de las acciones	148
3.3.7. Coeficientes de minoración parciales de las resistencias del terreno	148
3.3.8. Coeficientes de seguridad	149
3.3.8.1. Coeficientes de seguridad mínimos	149
3.3.8.2. Coeficientes de seguridad mínimos asociados con otras probabilidades de fallo	150
3.3.9. El cálculo con modelos numéricos	150
3.3.10. La fiabilidad en geotecnia	155
3.3.10.1. Fuentes de incertidumbre y su medida	155
3.3.10.2. El cálculo de referencia	158
3.3.10.3. Estudios de sensibilidad individuales	158
3.3.10.4. Composición de las sensibilidades individuales	159
3.3.10.5. Valor centrado del coeficiente de seguridad	159
3.3.10.6. Cálculo para la combinación cuasi-permanente	159
3.3.10.7. Cálculo para cada una de las combinaciones fundamentales	160
3.3.10.8. Cálculo en combinaciones accidentales o sísmicas	161
3.3.10.9. Índice de confianza y probabilidad de fallo	163
3.3.10.10. Verificación de la seguridad	164
3.4. FILTRACIONES Y CONSOLIDACIÓN	164
3.4.1. Problemas geotécnicos más comunes	164
3.4.2. Dibujo de redes de filtración	165
3.4.2.1. Terrenos homogéneos e isotrópos. Problemas bidimensionales	165
3.4.2.2. Terrenos anisótropos	166
3.4.2.3. Terrenos heterogéneos	166
3.4.2.4. Problemas tridimensionales	166

3.4.3.	Caudales de filtración	166
3.4.3.1.	Problemas bidimensionales, isotropos y homogéneos	166
3.4.3.2.	Terrenos anisotropos	168
3.4.3.3.	Terrenos heterogéneos	168
3.4.3.3.	Problemas tridimensionales	168
3.4.4.	Empujes del agua intersticial sobre estructuras	168
3.4.4.1.	Niveles de las aguas exteriores y de las líneas de saturación en terrenos naturales y rellenos	169
3.4.5.	Fuerzas de arrastre	172
3.4.6.	El problema del levantamiento de fondo	174
3.4.7.	Rebajamiento del nivel freático con pozos	176
3.4.8.	Arrastres de partículas y erosiones internas	177
3.4.9.	Arrastres, socavaciones y otras erosiones externas	179
3.4.10.	Consolidación de masas de suelo	180
3.4.10.1.	Formulación básica	180
3.4.10.2.	Los excesos de presión intersticial	181
3.4.10.3.	Subsidencia creada por los achiques	181
3.4.10.4.	Los asientos de consolidación	183
3.4.11.	Presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del nivel del mar	184
3.4.11.1.	Distribución de presiones intersticiales en fondos marinos	184
3.5	CIMENTACIONES SUPERFICIALES	189
3.5.1.	Tipos de cimentación	189
3.5.2.	Modos de fallo	190
3.5.2.1.	Estados Límite Últimos	190
3.5.2.2.	Estados Límite de Servicio	192
3.5.2.3.	Otros problemas de las cimentaciones superficiales	192
3.5.3.	Características de la cimentación	192
3.5.3.1.	Configuración geométrica	192
3.5.3.2.	Acciones	193
3.5.3.3.	Características del terreno	195
3.5.4.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	195
3.5.4.1.	Métodos de verificación	195
3.5.4.2.	Verificación según la experiencia local contrastada	196
3.5.4.3.	Verificación en función de los ensayos SPT	196
3.5.4.4.	Verificación mediante ensayos presiométricos	198
3.5.4.5.	Método basado en ensayos de penetración estática	199
3.5.4.6.	Métodos basados en otros ensayos de campo	200
3.5.4.7.	Carga de hundimiento en suelos cohesivos firmes y rocas	200
3.5.4.8.	Cálculo analítico de la carga de hundimiento	202
3.5.4.8.1.	Fórmula polinómica	202
3.5.4.8.2.	Factores de corrección	205
3.5.4.8.3.	Cimentaciones superficiales sobre terreno heterogéneo	208
3.5.4.8.4.	Cimentaciones en banqueta sobre suelos cohesivos	209
3.5.4.9.	Seguridad exigible frente al hundimiento	211
3.5.5.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	212
3.5.5.1.	Consideraciones previas	212
3.5.5.2.	Procedimiento de cálculo	212
3.5.5.3.	Seguridad frente al deslizamiento	214

3.5.6.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	215
3.5.6.1.	Vuelco rígido	215
3.5.6.2.	Vuelco plástico	216
3.5.6.3.	Seguridad frente al vuelco plástico	220
3.5.7.	Asientos y otros movimientos de las cimentaciones	220
3.5.7.1.	Zapatas aisladas	220
3.5.7.2.	Cimentaciones corridas	222
3.5.7.3.	Asientos de losas y cargas extensas	222
3.5.7.4.	Asientos admisibles	223
3.5.8.	Consideraciones sobre el proyecto estructural	224
3.6.	CIMENTACIONES PROFUNDAS	225
3.6.1.	Aspectos generales	225
3.6.1.1.	Tipos de terreno	225
3.6.1.2.	Tipos de pilote	227
3.6.2.	Modos de fallo más usuales	228
3.6.2.1.	Estados Límite Últimos	228
3.6.2.1.1.	Estados Límite Últimos de tipo geotécnico (GEO)	228
3.6.2.1.2.	Estados Límite Últimos de tipo estructural (STR)	228
3.6.2.2.	Estados Límite de Servicio	229
3.6.2.2.1.	Otras formas de fallo de las cimentaciones profundas	229
3.6.3.	Definición de los factores de proyecto	230
3.6.3.1.	Configuración geométrica	230
3.6.3.2.	Características del terreno	231
3.6.3.3.	Acciones	231
3.6.3.4.	Efectos parásitos	232
3.6.3.4.1.	Rozamiento negativo	232
3.6.3.4.2.	Empujes horizontales causados por sobrecargas verticales de superficie	234
3.6.3.4.3.	Empujes sobre pilotes en talud	236
3.6.3.5.	Efectos de las cargas cíclicas o alternativas	238
3.6.4.	La carga de hundimiento mediante fórmulas estáticas	242
3.6.4.1.	Formulación básica	242
3.6.4.2.	Carga de hundimiento en función del SPT	244
3.6.4.3.	Carga de hundimiento a partir de ensayos de penetración dinámica continuos	246
3.6.4.4.	Carga de hundimiento a partir de ensayos penetrométricos estáticos	246
3.6.4.5.	Carga de hundimiento calculada a partir del presiómetro	246
3.6.4.6.	Cimentaciones con pilotes sobre roca	247
3.6.4.7.	Métodos basados en soluciones analíticas	248
3.6.4.7.1.	Suelos granulares	248
3.6.4.7.2.	Suelos cohesivos	249
3.6.4.7.3.	Suelos cohesivos bajo la punta de los pilotes	250
3.6.4.8.	Pruebas de carga de hundimiento	251
3.6.5.	La carga de hundimiento mediante fórmulas dinámicas	252
3.6.5.1.	Fórmulas dinámicas de la hinca	253
3.6.5.2.	La ecuación de la onda	255
3.6.5.3.	El control de la hinca	257
3.6.6.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	261
3.6.6.1.	Hundimiento individual de un pilote	261
3.6.6.2.	Hundimiento conjunto del grupo	262
3.6.6.3.	Coeficientes de seguridad mínimos frente al hundimiento	262

3.6.7.	Verificación de la seguridad frente al arranque	263
3.6.7.1.	El pilote individual	263
3.6.7.2.	Consideración del efecto grupo	264
3.6.7.3.	Seguridad frente al arranque	264
3.6.8.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno por tiro o empuje horizontal	265
3.6.8.1.	El pilote individual	265
3.6.8.2.	Consideraciones del efecto grupo	267
3.6.8.3.	Coefficiente de seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	268
3.6.9.	Verificación de los Estados Límite de Servicio	268
3.6.9.1.	Asientos	268
3.6.9.1.1.	Asientos del pilote aislado	269
3.6.9.1.2.	Consideración del efecto grupo	269
3.6.9.2.	Movimientos horizontales y esfuerzos	269
3.6.9.2.1.	Método simplificado	270
3.6.10.	Consideraciones sobre los modos de fallo de tipo estructural	272
3.6.10.1.	Distribución de cargas en grupos de pilotes	273
3.6.10.2.	Resistencia estructural	274
3.7	ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE EMPUJES DE TIERRAS	275
3.7.1.	Tipologías	275
3.7.1.1.	Muros de gravedad	275
3.7.1.2.	Muros pantalla	276
3.7.1.3.	Entibaciones	276
3.7.2.	Valores límites del empuje	276
3.7.3.	Simplificaciones necesarias para el cálculo de empujes	278
3.7.3.1.	Geometría del trasdós del muro	278
3.7.3.2.	Heterogeneidades del terreno	281
3.7.3.2.1.	Relleno en talud	281
3.7.3.2.2.	Relleno en franja estrecha	283
3.7.3.3.	Inclinación de los empujes	283
3.7.4.	Método general de cálculo del empuje activo	284
3.7.4.1.	Geometría del problema	284
3.7.4.2.	Red de filtración	285
3.7.4.3.	Cargas externas	285
3.7.4.4.	Datos del terreno	285
3.7.4.5.	Tramos de cálculo	286
3.7.4.6.	Cálculo del empuje en cada tramo	287
3.7.5.	Métodos basados en el coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.1.	El concepto de coeficiente de empuje activo	290
3.7.5.2.	Valor del coeficiente de empuje activo	293
3.7.5.3.	Cálculo del empuje efectivo debido al peso del terreno	297
3.7.5.4.	El empuje del agua	298
3.7.5.5.	El efecto de la cohesión	299
3.7.5.6.	El efecto de las sobrecargas	301
3.7.5.6.1.	Sobrecargas verticales uniformes de gran extensión	301
3.7.5.6.2.	Sobrecargas verticales uniformes de extensión limitada	302
3.7.5.6.3.	Sobrecargas verticales lineales o concentradas	303
3.7.5.6.4.	Otras sobrecargas	304
3.7.6.	Método general de cálculo del empuje pasivo	305
3.7.6.1.	Datos necesarios	305

3.7.6.2.	Línea de rotura	305
3.7.6.3.	Cálculo del empuje	306
3.7.7.	Métodos basados en el coeficiente de empuje pasivo	307
3.7.7.1.	El concepto del coeficiente de empuje pasivo	307
3.7.7.2.	Valor del coeficiente de empuje pasivo	308
3.7.7.3.	Cálculo del empuje pasivo	310
3.7.8.	Cálculo del empuje al reposo	312
3.7.9.	Consideración de algunos casos singulares	314
3.7.9.1.	Empuje activo en muros paralelos	314
3.7.9.2.	Pantallas de anclaje enterradas	316
3.7.9.3.	Pilotaje en el trasdós de los muros	316
3.7.9.4.	Efecto silo	318
3.7.10.	Empuje sobre entibaciones	319
3.7.11.	Modos de fallo más usuales de las estructuras de contención	320
3.7.11.1.	Estados Límite Últimos	320
3.7.11.1.1.	Caracterización de las situaciones de proyecto	324
3.7.11.1.2.	Verificación de la seguridad frente al vuelco en los muros de gravedad	325
3.7.11.1.3.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en muros pantalla	328
3.7.11.1.4.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento del fondo de entibaciones	331
3.7.11.2.	Estados Límite de Servicio	331
3.7.11.2.1.	Movimiento de los muros de gravedad	331
3.7.11.2.2.	Movimiento de los muros pantalla	332
3.8.	ESTABILIDAD DE TALUDES	335
3.8.1.	Introducción	335
3.8.2.	Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite Últimos	336
3.8.2.1.	Pérdida de la estabilidad global	336
3.8.2.2.	Deformaciones	336
3.8.2.3.	Erosiones	336
3.8.3.	Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite de Servicio	336
3.8.4.	El cálculo de la estabilidad global en suelos	338
3.8.4.1.	Tipos de deslizamiento	338
3.8.4.2.	Caracterización de las situaciones de proyecto	339
3.8.4.3.	Principios generales del cálculo	342
3.8.4.4.	Deslizamiento plano indefinido	343
3.8.4.5.	Estudio de deslizamientos circulares	344
3.8.4.5.1.	Método del círculo de rozamiento	344
3.8.4.5.2.	Ábacos de Taylor	346
3.8.4.5.3.	Método de las rebanadas. Líneas circulares	346
3.8.4.6.	Estudio de deslizamientos no circulares	350
3.8.4.6.1.	Método de las rebanadas. Líneas no circulares	350
3.8.4.6.2.	Método de las cuñas	351
3.8.5.	El cálculo de la estabilidad global en rocas	352
3.8.5.1.	Tipos de inestabilidad	353
3.8.5.2.	Caracterización de la situación de proyecto	353
3.8.5.3.	Principios generales de cálculo	356
3.8.6.	Coefficientes de seguridad mínimos frente a la pérdida de estabilidad global	358
3.8.7.	Consideración de las deformaciones	358
3.9.	MEJORA DEL TERRENO	359
3.9.1.	Aspectos generales	359

3.9.2.	Precargas	360
3.9.2.1.	Mejoras producidas por las precargas	360
3.9.2.2.	Tipos de precargas	360
3.9.2.3.	Reconocimientos previos	361
3.9.2.4.	Proyecto de precargas	361
3.9.2.5.	Observación del tratamiento	363
3.9.3.	Vibración profunda	363
3.9.3.1.	Tipos de tratamiento	364
3.9.3.2.	Mejoras alcanzables	364
3.9.3.3.	Procedimientos de control	365
3.9.4.	Compactación dinámica	366
3.9.5.	Compactación con explosivos	368
3.9.6.	Inclusiones rígidas	369
3.9.6.1.	Dimensionamiento de las inclusiones	370
3.9.7.	Inyecciones	372
3.9.7.1.	Inyecciones de impregnación	372
3.9.7.2.	Inyecciones de compactación (Compaction-Grouting)	372
3.9.7.3.	Inyecciones con tubos manguito (Clauquage)	373
3.9.7.4.	Inyecciones de alta presión (Jet-Grouting)	374
3.9.8.	Otros procedimientos	374
3.10.	EFFECTOS DINÁMICOS	375
3.10.1.	Consideraciones generales	375
3.10.2.	Comportamiento dinámico sin drenaje	376
3.10.2.1.	Generación de presiones intersticiales	377
3.10.2.2.	Resistencia dinámica sin drenaje	377
3.10.2.3.	Deformaciones bajo la actuación de cargas cíclicas, sin drenaje	379
3.10.3.	Comportamiento dinámico con drenaje	380
3.10.4.	Comportamiento del suelo frente al sismo	382
3.10.4.1.	Caracterización del movimiento sísmico	383
3.10.4.1.1.	Magnitud	383
3.10.4.1.2.	Intensidad	383
3.10.4.1.3.	Aceleración del terreno	384
3.10.4.1.4.	Espectro de respuesta	384
3.10.4.2.	Licuefacción del suelo debido a la acción sísmica	386
3.10.4.3.	Acciones sísmicas transmitidas al terreno de cimentación a través de la estructura resistente	389
3.10.5.	Cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura	389
3.10.5.1.	Cálculo dinámico de la cimentación	391
3.10.5.2.	Cálculo pseudo-estático de la cimentación	392
3.10.5.2.1.	Acciones estáticas equivalentes a la acción del oleaje o del viento	392
3.10.5.2.2.	Acciones estáticas equivalentes a la acción sísmica	393
3.10.5.2.2.1.	Fuerzas estáticas equivalentes sobre los cimientos	394
3.10.5.2.2.2.	Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de modos de fallo de pérdida de la estabilidad global	394
3.10.5.2.3.	Empujes de tierra equivalentes sobre estructuras de contención	394
3.10.5.2.3.1.	Empuje activo	395
3.10.5.2.3.2.	Empuje pasivo	398
3.10.5.2.4.	Fuerzas estáticas equivalentes para la verificación de la estabilidad de taludes	398

3.1 ASPECTOS GENERALES

La publicación de la ROM 0.0, donde se establece el procedimiento general y las bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias, ha motivado la adecuación de los criterios geotécnicos de esta ROM 0.5 para inscribirlos en ese procedimiento general y adaptarlos a las bases de cálculo que allí se recomiendan.

Es esencial, según se expone en la ROM 0.0, que antes de definir la solución de un determinado problema, se fijen, en función del carácter de la obra (o del tramo de obra), las probabilidades de fallo que resulten más convenientes. En todo caso, Puertos del Estado, a través de la ROM 0.0, ha indicado unos topes máximos a las probabilidades de fallo.

Esta Parte 3 de la ROM 0.5 considera, en primer lugar, los criterios para la asignación de máximas probabilidades de fallo individual durante la Fase de proyecto considerada frente a cada uno de los modos de fallo geotécnicos que pueden presentarse en las obras marítimas y portuarias, correspondientes a Estados Límite Últimos, de Servicio y de Parada Operativa, con el objeto de que se cumplan las máximas probabilidades conjuntas exigidas en la ROM 0.0.

La probabilidad de fallo geotécnico es una más a componer dentro del conjunto global de posibles fallos y, en consecuencia, debe ser claramente menor que el tope fijado en la ROM 0.0. En general, y salvo que en algún caso concreto se pueda establecer probabilidades de fallo geotécnico con mayor precisión, en esta ROM 0.5 se opta por establecer unas probabilidades de fallo claramente menores que las indicadas en la ROM 0.0 y de ese modo puede desprejiciarse su contribución a la probabilidad conjunta de fallo, simplificándose de esa manera el diagrama de fallo y los cálculos de la probabilidad conjunta de fallo de la obra.

Después, y como consecuencia de lo anterior, se describen procedimientos recomendables de verificación de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad exigidas de las obras marítimas y portuarias y de sus tramos en los diferentes estados de proyecto ante los diversos modos de fallo geotécnicos que puedan presentarse. Dentro de estos procedimientos se consideran los que se basan en cálculos, diferenciándose los de Niveles I, II y III, desarrollando fundamentalmente los de Nivel I.

En esta Parte 3, además, se incluyen soluciones conocidas de fácil uso para resolver problemas de cálculo comunes de la geotecnia y que tienen cierta aplicación en todo tipo de obras. La mayor parte de estos métodos de cálculo tienen en cuenta las oscilaciones del mar considerando aceptables equivalencias estáticas de los niveles de agua, no pudiendo aplicarse cuando la influencia del carácter cíclico o impulsivo de las oscilaciones del mar (oleaje, mareas, ...) sea relevante en el comportamiento del terreno, así como cuando éstas sean un agente predominante en el desencadenamiento del modo de fallo.

En el apartado final de esta Parte 3 y mientras se editan las ROM correspondientes, se incluyen algunas recomendaciones de carácter general sobre el comportamiento del terreno ante la presencia de agentes de carácter dinámico, cíclico o impulsivo. De esta forma, se ha incluido un avance respecto al comportamiento del terreno frente a las acciones sísmicas. Otros documentos del Programa ROM, ligados a las distintas tipologías de obras marítimas y portuarias, desarrollarán estos aspectos con mayor profundidad.

3.2 CRITERIOS DE SEGURIDAD, SERVICIO Y EXPLOTACIÓN

El comportamiento tensional y de deformación del terreno bajo los efectos de los agentes actuantes puede ser el predominante en algunos modos de fallo de las obras marítimas y portuarias y, por tanto, tener efectos significativos para su seguridad y su servicio. El proyecto geotécnico debe evitar, con determinadas garantías, la rotura del terreno y, en general, cualquier comportamiento anómalo de la obra causada por éste.

Los elementos esenciales del proyecto geotécnico son los siguientes:

- ◆ Investigación geotécnica.
- ◆ Elección de la tipología de la solución.

- ◆ Definición del proceso constructivo.
- ◆ Estudio de los detalles de la solución.
- ◆ Cálculos justificativos.
- ◆ Observación del comportamiento.

Todos estos elementos quedan imbricados entre sí, pues las decisiones que se tomen al determinar cualquiera de ellos afectarán al resto.

Los fallos de las obras marítimas y portuarias pueden deberse a un defecto parcial en alguna de estas actividades. Son evidentes las consecuencias negativas que se derivarían de una mala concepción general de la obra (tipología inadecuada) o de una investigación geotécnica deficiente.

Los fallos deben evitarse no sólo reconociendo bien el terreno y optando por soluciones constructivas adecuadas sino también cuidando los detalles, adoptando modelos de cálculo o experimentales adecuados y observando el comportamiento de la obra durante la construcción y la explotación.

Es difícil normalizar el proceso conceptual necesario para guiar al ingeniero en cada una de estas tareas. A pesar de ello, esta ROM 0.5 intenta hacerlo. Para ello, se han incluido buen número de recomendaciones que deben conducir a una obra suficientemente segura y funcional ante modos de fallo, denominados geotécnicos, en los que el terreno es el agente cuyo efecto es predominante.

La línea conceptual que rige la revisión de la anterior ROM 0.5-94 está expuesta en la ROM 0.0. De allí se han extraído los criterios de seguridad, servicio y explotación básicos que han de seguirse en el proyecto geotécnico, definiéndose para una determinada obra o tramo de la misma:

Fiabilidad: Valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la Fase de proyecto frente a todos los modos principales adscritos a los Estados Límite Últimos.

Funcionalidad: Valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la Fase de proyecto frente a todos los modos principales adscritos a los Estados Límite de Servicio o de utilización.

Operatividad: Es el valor complementario de la probabilidad de parada en la Fase de proyecto frente a todos los modos de parada principales adscritos a los Estados Límite de Parada Operativa. El modo de fallo operativo difiere del modo de fallo funcional en que, una vez cesa el agente que causa la parada operativa (generalmente climático), la obra y sus instalaciones vuelven a estar en explotación con los requisitos especificados en el proyecto. Por el contrario, el fallo funcional persiste y sólo se recupera mediante la reparación o reconstrucción de la obra.

3.2.1 Fiabilidad frente a Estados Límite Últimos

La seguridad de una obra (o de un tramo de obra, como define la ROM 0.0) en una Fase de proyecto puede medirse al menos conceptualmente. Como parámetro de medida puede utilizarse la probabilidad de fallo frente al conjunto de todos los posibles modos de fallo principales asociados a los Estados Límite Últimos que pudieran presentarse a lo largo de la Fase de proyecto analizada. Con este parámetro de medida, la fiabilidad de la obra sería el complemento hasta la unidad de la probabilidad de fallo.

Se usa como medida de este concepto el “índice de fiabilidad” β , también denominado índice de confianza y que tiene, con la probabilidad de fallo p , una relación biunívoca:

$$\beta = -\phi^{-1}(p) \quad \text{ó} \quad p = \phi(-\beta)$$

siendo ϕ la función de probabilidad acumulada estándar normalizada.

La seguridad mínima exigida a las obras marítimas y portuarias en cada una de las Fases de proyecto es función de la importancia de las mismas definida a través de su carácter general, establecido en función de los índices de repercusión económica (IRE) y de repercusión social y ambiental (ISA) que son indicadores de las repercusiones económicas, sociales y ambientales generadas en caso de destrucción de la misma (Ver ROM 0.0). En este sentido, la seguridad debe ser mayor cuando las consecuencias sociales o ambientales de la rotura son graves (Índice social y ambiental, ISA, alto o muy alto). En estos casos, el ingeniero debe tomar todas las precauciones necesarias para evitar posibles daños. La probabilidad de fallo que aquí se indica (10^{-4} en la vida útil) es consistente con lo que se especifica en otros códigos de cálculo. Esa probabilidad es únicamente una referencia formal necesaria para ordenar el proyecto. Como se ha dicho, el fallo no debe ocurrir. En muchas obras marítimas el daño suele ser estrictamente económico (ISA no significativo o bajo) y, entonces, se debería pensar en optimizar el proyecto mediante alguna teoría de coste generalizado mínimo. En estas obras (daños estrictamente materiales) debe establecerse una fiabilidad específica, calculada para cada caso concreto, aunque se recomienda que ésta no sea menor que la recomendada en la ROM 0.0 en función del índice ISA que le sea de aplicación. No es objeto de esta ROM la definición del proceso de optimización correspondiente.

Realizados los cálculos de optimización económica a que haya habido lugar y después de obtener la fiabilidad óptima que debe asignarse a un determinado proyecto, es posible que resulten fiabilidades mucho más bajas (o probabilidades de fallo mucho más altas) que las usuales aceptadas en otras ramas de la ingeniería civil.

Es también evidente que puede ocurrir lo contrario: los estudios de optimización de las obras pueden conducir a la conveniencia de proyectar obras más seguras y de mayor funcionalidad que los umbrales mínimos recomendados, al conseguirse aumentos de fiabilidad de la obra con costes económicos moderados. Por este motivo se recomienda al ingeniero geotécnico que haga una estimación de cada caso. Puede resultar interesante proyectar obras más seguras y funcionales, con probabilidades de fallo mucho más bajas que las indicadas.

Finalmente, debe decirse que existen normas de rango claramente superior a las Recomendaciones del Programa ROM que han de cumplirse obligatoriamente para la verificación de la seguridad de determinados modos de fallo, salvo justificación expresa y fehaciente. Entre ellas deben destacarse la norma EHE, para proyecto y construcción de obras de hormigón, y las normas europeas, cuando entren en el período obligatorio (Eurocódigos).

En cualquier caso, siguiendo lo indicado en la ROM 0.0, la probabilidad conjunta de fallo durante la Fase de proyecto analizada de las obras marítimas y portuarias debe ser menor que los umbrales que se estipulan en función del impacto socio-ambiental del fallo (índice ISA).

La definición del índice ISA, que crece a medida que lo hacen las consecuencias socioambientales del fallo, así como los valores umbrales recomendados para la fiabilidad y la probabilidad de fallo en función de ese índice, deben verse en la ROM 0.0. Allí también se explica el concepto de «vida útil» y el proceso necesario para definirlo cuantitativamente a través del índice IRE.

De acuerdo con lo dispuesto en la ROM 0.0. respecto a la sensibilidad de la probabilidad conjunta de fallo frente a algunos modos de fallo cuya probabilidad de ocurrencia se reduce drásticamente con pequeñas modificaciones de la geometría de la obra o de alguno de sus elementos y cuya repercusión económica no es significativa, simplificada esta ROM 0.5 considera con carácter general que los fallos geotécnicos (que son sólo una parte de los varios que contribuyen a la probabilidad global de fallo) en la mayor parte de las obras marítimas y portuarias en la que las oscilaciones del mar no sean el agente predominante en el desencadenamiento del modo de fallo geotécnico admiten probabilidades de ocurrencia individual claramente menores (incluso de otro orden de magnitud) que las indicadas en la ROM 0.0 para el conjunto de fallos sin incidir de forma relevante en la optimización económica de la obra. En estos casos y siempre que se adopte este criterio, los modos de fallo geotécnicos podrán no ser considerados como fallos principales y, por tanto, despreciarse su contribución en el cálculo de la probabilidad global de fallo, simplificándose enormemente los diagramas de fallo y el cálculo de la probabilidad conjunta de fallo de la obra.

A estos efectos, las probabilidades de fallo individuales correspondientes a modos de fallo principales del tipo geotécnico asociadas a los métodos de verificación de Nivel I que, para los Estados Límite Últimos, se adoptan con carácter general en esta ROM son del orden de las siguientes:

Tabla 3.2.1. Probabilidad de fallo individual asociada a los métodos de verificación de Nivel I que se adoptan en esta ROM (Estados Límite Últimos. Modos de fallo geotécnicos)

Índice ISA	No significativo < 5	Bajo 5 a 9	Alto o muy alto ≥ 20
Máxima probabilidad de fallo en la vida útil	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}
Índice de confianza	2,33	3,09	3,72

En aquellos casos en que estos aumentos de la fiabilidad de la obra asociadas a modos de fallo del tipo geotécnico sean muy difíciles de conseguir o estén alejados de los que resulten adecuados desde el punto de vista económico y, por tanto, las probabilidades de fallo individuales consideradas no puedan ser tan bajas o las oscilaciones del mar sean el agente predominante en el desencadenamiento del fallo (p.e. diques de abrigo de paramento vertical o reflejantes, estados o situaciones de proyecto de corta duración como fases constructivas, ...), los modos de fallo geotécnicos deberán considerarse como modos de fallo principales, no pudiendo despreciarse su contribución a la probabilidad global de fallo. Estos casos son señalados en la Parte 4 de esta ROM, así como en otros documentos ROM, indicándose el valor de la probabilidad de fallo individual asociada al método de verificación de Nivel I adoptado (ver apartado 4.7.3).

3.2.2 Funcionalidad frente a Estados Límite de Servicio

El terreno, tanto debido a los movimientos o deformaciones excesivos inducidos en las obras como a los movimientos que se pueden originar en su seno, puede provocar reducciones o pérdidas de funcionalidad que afecten a las posibilidades de normal uso o explotación de la obra o de un tramo de la misma, incumpliendo los requisitos de servicio (Estados Límite de Servicio). Un ejemplo es el asiento excesivo que impide el correcto funcionamiento de un puente grúa.

La funcionalidad de una obra (o de un tramo de obra, como define la ROM 0.0) en una Fase de proyecto puede medirse utilizando como parámetro la probabilidad de fallo frente al conjunto de todos los posibles modos de fallo principales asociados a los Estados Límite de Servicio (sean o no provocados por el terreno) que pudieran presentarse a lo largo de la Fase de proyecto analizada. Con este parámetro de medida, la funcionalidad de la obra sería el complemento hasta la unidad de dicha probabilidad de fallo.

La funcionalidad mínima exigida a las obras marítimas y portuarias en cada una de las Fases de proyecto es función de la importancia de las mismas definida a través de su carácter general, establecido, al igual que para la fiabilidad, en función de los índices IRE e ISA. En este sentido, la funcionalidad debe ser mayor cuando las consecuencias sociales y ambientales de los fallos de servicio sean importantes (ISA alto). No obstante, en muchas obras marítimas las consecuencias del fallo funcional suelen ser estrictamente económicas (ISA bajo o medio), y entonces es recomendable realizar un estudio de optimización económica para obtener la funcionalidad óptima correspondiente a cada proyecto.

En estos casos debe establecerse una funcionalidad específica, calculada para cada caso concreto, aunque se recomienda que ésta no sea menor que la fijada en la ROM 0.0 en función del índice ISA que le sea de aplicación. No es objeto de esta ROM la definición del proceso de optimización correspondiente.

A falta de otros estudios más específicos, se recomienda que la probabilidad individual asociada a modos de fallos funcionales principales causados por el terreno en la Fase de proyecto analizada, siempre que se considere más de un modo de fallo en el diagrama de fallo y, por tanto, en el cálculo de la probabilidad conjunta de fallo funcional, se limite a los siguientes valores:

Tabla 3.2.2. Máxima probabilidad de fallo individual asociada a los métodos de verificación de Nivel I que se adoptan en esta ROM (Estados Límite de Servicio. Modos de fallo geotécnicos)

Índice ISA	No significativo < 5	Bajo 5 a 9	Alto o muy alto ≥ 20
Máxima probabilidad de fallo en la vida útil	0,10	0,07	0,05
Índice de confianza β	1,28	1,48	1,65

3.2.3 Operatividad frente a los Estados Límite de Parada Operativa

La operatividad de una obra (o de un tramo de la misma) en una Fase de proyecto puede medirse utilizando como parámetro la probabilidad de parada en la Fase de proyecto frente al conjunto de todos los posibles modos de parada principales adscritos a los Estados Límite de Parada Operativa. Se define como modo de parada operativa a la causa por la cual la obra o alguno de sus tramos deben dejar de operar o deben reducir su nivel funcional, volviendo a su normal explotación una vez que cesa la causa de la parada.

Por tanto, al no poder darse modos de parada operativa causados directamente por el terreno, al no comportarse en estos casos como agente, no se considerarán modos de parada operativa debidos al terreno.

En este sentido, como ejemplo para una mayor comprensión, puede citarse que un modo de fallo operativo puede ser la superación de la capacidad de drenaje (inundación) de una instalación. Este fallo operativo es causado por el agente climático precipitación. Aunque pudiera tener influencia un parámetro del terreno como puede ser la permeabilidad, la probabilidad de ocurrencia de este modo de fallo operativo está directamente relacionada con la probabilidad de excedencia del citado agente climático.

En cualquier caso el proyectista procurará, siempre que sea posible y necesario, que las soluciones utilizadas en el proyecto geotécnico contribuyan a reducir los efectos debidos a la presentación del agente causante de la parada operativa y, por tanto, aumentar el nivel del agente causante que produce el fallo operativo analizado, dando lugar de esta forma a un aumento de la operatividad.

3.3 CÁLCULOS JUSTIFICATIVOS

Para justificar que una obra o un tramo de la misma es suficientemente fiable y funcional desde el punto de vista geotécnico, pueden seguirse varios caminos:

- a. Comparación con experiencias similares.
- b. Disposiciones constructivas bien probadas.
- c. Modelos de laboratorio y/o ensayos de campo a gran escala.
- d. Método observacional.
- e. Cálculos justificativos.

Normalmente las disposiciones y detalles de los proyectos se justificarán mediante cálculos, salvo que pueda aversarse que el comportamiento de la obra va a ser adecuado por algún otro procedimiento suficientemente fiable.

Los cálculos que se realicen para verificar proyectos incluidos dentro del alcance del Programa ROM deben encuadrarse, siempre que sea posible, dentro del procedimiento general de cálculo conocido como “método de los Estados Límite”. Este procedimiento queda establecido en la ROM 0.0, cuyo conocimiento es recomendable para cualquier ingeniero que haya de verificar la fiabilidad o funcionalidad de una obra.

Se entiende que una obra es segura y funcional cuando la probabilidad de que durante cualquier Fase de proyecto se exceda al menos uno de cada una de las series de Estados Límite Últimos o de Servicio respectivamente que conforman los diagramas de fallo, es suficientemente baja.

3.3.1 Estados Límite Últimos (ELU)

Los estados límite últimos (ELU) son aquellos estados que producen la ruina por rotura o colapso estructural de la obra o de parte de ella. A efectos de ordenar los cálculos geotécnicos conviene clasificar los posibles modos de fallo adscritos a los Estados Límite Últimos en alguno de los grupos siguientes:

- EQU. *Pérdida de equilibrio estático.* La estructura pierde sus condiciones de estabilidad como consecuencia de alguna acción excesiva sin que la resistencia de los materiales de la estructura o la resistencia del

terreno jueguen algún papel apreciable en ello. Un modo de fallo típico que conduce a este estado es el denominado “vuelco rígido” en esta ROM 0.5.

- STR. *Agotamiento de algún elemento estructural de la cimentación.* Se denomina “elemento estructural de la cimentación” a aquella parte de la estructura que está en contacto directo con el terreno. Esos elementos pueden agotar su resistencia de diversos modos (punzonamiento, flexión ...) en los que la resistencia del material juega un papel primordial y la resistencia del terreno juega un papel secundario.
- GEO. *Rotura del terreno.* Son aquellos fallos en los que la resistencia del terreno juega un papel esencial. Como ejemplo de modo de fallo adscrito a este tipo de ELU, puede citarse el hundimiento de una cimentación superficial o profunda.
- UPL. *Fallos debidos al exceso de presión de agua.* Son aquellos fallos provocados por excesos de presión hidrostática o hidrodinámica en los que la resistencia mecánica del terreno y de la estructura juegan un papel secundario. Un ejemplo de modo de fallo adscrito a este tipo de ELU sería la flotación de la base de un dique seco de solera drenada por fallo del sistema de achique.
- HYD. *Fallos ocasionados por la filtración de agua en el terreno.* La filtración de agua puede provocar arrastres (erosiones internas) que provocan la ruina de la obra marítima. Un ejemplo de modo de fallo adscrito a este tipo de ELU sería la pérdida de finos del núcleo de un dique en talud durante un temporal.

La clasificación de cada modo de fallo correspondiente a un Estado Límite Último que pueda darse en una obra o en un tramo de la misma dentro de alguno de estos cinco grupos es relevante, pues para cada uno de ellos se recomendarán en esta ROM procedimientos de cálculo específicos.

Dichos grupos constituyen un mayor desarrollo de los incluidos con carácter general en la ROM 0.0 con el objeto de resaltar en mayor medida los modos de fallo geotécnicos. De esta forma, los grupos EQU y UPL se corresponderían con un Estado Límite Último de pérdida de equilibrio estático, STR y GEO con un Estado Límite Último de agotamiento resistente y HYD con un Estado Límite Último de deformación.

3.3.2 Estados Límite de Servicio (ELS)

Los estados límite de servicio (ELS) son aquellos estados que producen la pérdida de funcionalidad de la obra o de una parte de ella, de forma reversible o irreversible, debido a un fallo estructural, estético, ambiental o por condicionante legal. En los Estados Límite de Servicio se consideran todos aquellos modos de fallo que reducen o condicionan el uso y explotación de la obra o que pueden significar una reducción de su vida útil.

Los fallos funcionales que pueden provocar que una obra deje de cumplir los requisitos de servicio exigidos en las premisas de proyecto, aún no implicando la ruina inmediata, han de ser establecidos en cada caso concreto.

A efectos de ordenar los cálculos geotécnicos, los posibles modos de fallo funcionales adscritos a los Estados Límite de Servicio pueden clasificarse en alguno de los siguientes grupos:

- DEX. *Deformaciones excesivas del terreno.* Son aquellos fallos funcionales producidos por deformaciones o movimientos excesivos del terreno que, bien directamente o bien de forma inducida en las instalaciones o elementos estructurales que se apoyan o están ubicados en su entorno, impiden el correcto funcionamiento de la obra o de un tramo de la misma. Como ejemplo de este modo de fallo puede citarse el asiento del camino de rodadura de una grúa.
- AGS. *Alteraciones geométricas significativas.* Se recogen las situaciones alcanzadas por la obra o alguno de sus elementos en las que alteraciones, acumulaciones o erosiones producidas en el terreno inducen la generación de una acumulación de cambios geométricos que impiden satisfacer los requisitos de servicio. Un ejemplo de este modo de fallo puede ser la pérdida progresiva de calado en un canal de navegación por inestabilidad de sus taludes laterales o deformaciones excesivas en un muelle por causa de la erosión o socavación del terreno.
- EST. *Estéticos.* Son aquellos fallos provocados por la acción del terreno que afectan al aspecto estético de la obra. Como ejemplo de este modo de fallo puede citarse la pérdida de alineación del cantil o la pérdida de la verticalidad de un muelle.

- FIL. *Fallos ocasionados por la filtración de agua en el terreno.* La filtración de agua o el efecto de las oscilaciones del mar en el terreno pueden producir efectos que afecten la funcionalidad de la obra. Son ejemplos de este modo de fallo funcional los asentamientos inducidos en explanadas por lavado de rellenos y los caudales de filtración excesivos en achiques.

Dichos grupos constituyen un mayor desarrollo de los incluidos con carácter general en la ROM 0.0 con el objeto de resaltar en mayor medida los modos de fallo geotécnicos. De esta forma los grupos DEX y FIL se corresponderían con un Estado Límite de Servicio de deformaciones excesivas, AGS con un Estado Límite de Servicio de alteraciones geométricas acumulativas y EST con un Estado Límite de Servicio de aspectos estéticos, ambientales y legales

3.3.3 Estados Límite de Parada Operativa (ELO)

Los estados límite de parada operativa (ELO) son aquellos estados en los que se reduce o suspende temporalmente la explotación por causas externas a la obra o a sus instalaciones, sin que haya daño estructural en ella o en alguno de sus elementos. Una vez cesada la causa, la obra y sus instalaciones recuperan totalmente los requisitos de explotación establecidos en el proyecto.

La posible contribución del terreno en la ocurrencia de algún modo de fallo operativo puede considerarse despreciable al no comportarse normalmente el terreno como agente causante de una parada operativa transitoria y autosubsanable.

3.3.4 Métodos de cálculo

El objetivo de los métodos de cálculo de los estados límite es verificar que una obra o un tramo de la misma en cada una de las Fases de proyecto satisface los requisitos mínimos de seguridad, de servicio y de uso y explotación exigidos en esta ROM, en la ROM 0.0 y en otras normas que le sean de aplicación. Para ello deberá verificarse el proyecto para todos los modos de fallo que puedan presentarse en cada Estado Límite, evaluar la probabilidad de ocurrencia de cada uno de ellos en la Fase analizada y la probabilidad conjunta de presentación de todos los modos principales, de forma que no se superen los valores recomendados.

Identificado un determinado estado límite y modo de fallo, existen varios tipos o clases de procedimientos de cálculo que se pueden seguir para cuantificar la fiabilidad y funcionalidad de la obra frente a tal suceso. En la Parte 3 de esta ROM se describen algunos de los procedimientos más usuales, cuya aplicación se recomienda, basados en el establecimiento de una ecuación de verificación, así como los criterios de aceptación de la verificación. Son los procedimientos de cálculo más comunes.

Debe recordarse que existen modos de fallo que no son susceptibles de análisis cuantitativo (cálculos) y para estas situaciones únicamente el buen juicio del ingeniero, ayudado por la experiencia, indicará si las disposiciones adoptadas para evitarlo son suficientes. Existirán también modos de fallo que no necesitan ser analizados cuantitativamente, ya que se pueden evitar adoptando soluciones ampliamente sancionadas en la práctica. En estos casos puede considerarse que la probabilidad de ocurrencia de este modo de fallo es muy baja, clasificándolo como modo de fallo no principal y, por tanto, no tomando en consideración su participación en el cálculo de la probabilidad conjunta de fallo.

El método basado en la observación de la obra durante la construcción (Método Observacional) puede ser de interés en aquellas circunstancias en las que los métodos antes citados (cálculos o prescripciones) no ofrecen suficientes garantías.

Finalmente cabe apuntar métodos basados en ensayos a escala similar a la real o en estudio de modelos físicos de la obra. En estos casos, a efectos de aceptación de la verificación y de evaluación de la probabilidad de presentación de uno o todos los modos de fallo, deberán analizarse los resultados experimentales mediante modelos de probabilidad.

Hay una filosofía común a todos los cálculos justificativos de la seguridad, funcionalidad y operatividad de una obra o de un tramo de la misma. Estas ideas se describen a continuación de manera que los distintos estudios relativos a una misma obra se realicen con un fundamento uniforme.

Para aquellos modos de fallo que sean verificables de acuerdo con un determinado método de cálculo, existirá en esta ROM un procedimiento de cálculo que permita establecer la condición de fallo que corresponde a cada caso.

Para cada modo de fallo adscrito a un Estado Límite, Último o de Servicio, se establece una ecuación de verificación. La ecuación de verificación es una ecuación de estado; por tanto los factores de proyecto que intervienen en ella podrán tomar valores nominales o serán variables estadísticas en función del nivel del método de verificación que se utilice.

La ecuación de verificación, $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$, es una función que define la condición de fallo teniendo como variables todos los factores de proyecto que intervienen en el cálculo, principalmente en el caso de modos de fallos geotécnicos: la geometría de la obra y del terreno, los parámetros del terreno y los agentes y acciones.

Comentario: Las ecuaciones de verificación de los problemas más comunes de la geotecnia suelen expresarse en el formato de "coeficiente de seguridad", F , como sigue:

$$F = \frac{T_f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{T_d(x_1, x_2, \dots, x_n)}$$

donde T_f y T_d son expresiones que agrupan las resistencias (o términos favorables) y las solicitaciones (o términos desfavorables) respectivamente. En algunas ocasiones (problemas de estabilidad global, por ejemplo) los factores x_i son función de F y la ecuación de verificación no resulta explícita. Su resolución requiere un proceso iterativo para el cálculo de F .

En algunas ocasiones, puede resultar conveniente expresar la ecuación de verificación en el formato de "margen de seguridad", MS , como sigue:

$$MS = T_f(x_1, x_2, \dots, x_n) - T_d(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Esta ecuación de verificación de la condición de fallo puede usarse en el contexto de cálculos de tres tipos o niveles.

Nivel I. Método del coeficiente de seguridad global o Método de los coeficientes parciales.

La seguridad o funcionalidad se introduce afectando a los valores representativos concretos de los factores de proyecto que intervienen en la ecuación de verificación por coeficientes adecuados a la fiabilidad o funcionalidad establecidas como objetivo de proyecto, que ponderan su simultaneidad y compatibilidad, así como el sentido (favorable o desfavorable) en la ocurrencia del modo, así como a través del coeficiente de seguridad o margen de seguridad mínimo exigido.

El cálculo justificativo queda concluido cuando el coeficiente de seguridad o el margen de seguridad obtenido es igual o mayor que el mínimo exigido, que en el método de los coeficientes parciales suele ser generalmente 1 y cero respectivamente.

Nivel II. Método del índice de confianza (β).

La fiabilidad y funcionalidad que se fijen como objetivo de proyecto, directamente relacionada con la probabilidad de fallo, debe traducirse a un índice de confianza equivalente. El índice de confianza o de fiabilidad suele denominarse con la letra griega β .

Los valores de los factores de proyecto, x_i , que intervienen en la ecuación de verificación, se representan, no mediante valores concretos sino como variables aleatorias, a través de sus funciones de distribución y de covarianza.

Transformando las funciones de distribución y de covarianza en términos de variables gaussianas normalizadas e independientes, el índice de confianza β es igual, de manera aproximada, a la distancia mínima del origen de coordenadas a la hipersuperficie de fallo $G(x_i) = 0$.

El cálculo justificativo queda concluido cuando el índice de confianza obtenido es mayor o igual que el fijado como objetivo de proyecto.

Nivel III. Cálculo de la probabilidad de fallo.

Los factores de proyecto que intervienen en la ecuación de verificación se representan como variables aleatorias a través de funciones de distribución conjuntas.

En la mayor parte de los casos, alcanzar una solución analítica que permita calcular la probabilidad de fallo es una tarea muy compleja. Normalmente el cálculo exige la realización de numerosas simulaciones, en cada una de las cuales se generan valores aleatorios de los factores de proyecto x_i que obedezca a sus respectivas leyes probabilísticas. Como resultado de todas las simulaciones se obtendrán algunas situaciones de fallo que supondrán una cierta fracción del total de simulaciones realizadas. Esta fracción es la probabilidad de fallo.

El cálculo justificativo queda concluido si la probabilidad de fallo obtenida es menor que la establecida como objetivo de proyecto.

En la ROM 0.0 se consideran con más detalle estos métodos de cálculo.

Al igual que para el resto de modos de fallo, el método de verificación recomendado para los modos de fallo geotécnicos es función del carácter general de la obra establecido de acuerdo con la ROM 0.0 en función de los índices IRE e ISA. Por tanto, para verificar la seguridad y funcionalidad de las obras incluidas en el ámbito de aplicación del Programa ROM, deberán utilizarse siempre métodos de Nivel I. Los métodos de Nivel II o Nivel III habrán de utilizarse adicionalmente en las obras con IRE o ISA alto o muy alto, que se corresponden con las definidas como de categoría A en la Tabla 2.12.1 de esta ROM 0.5 a efectos de los reconocimientos geotécnicos.

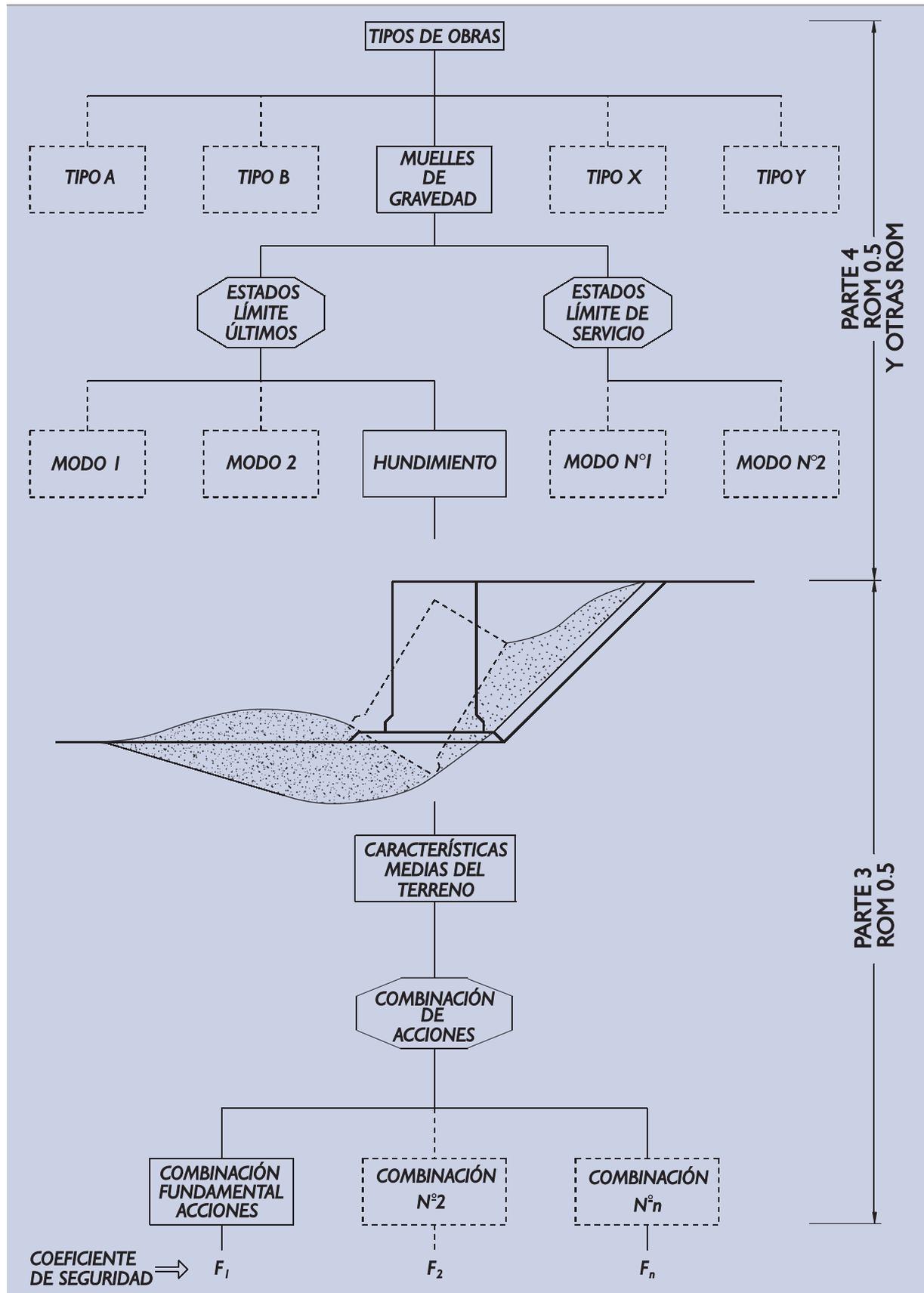
En los proyectos de obras de categoría A, en los que debe realizarse una verificación múltiple (al menos doble) de la seguridad y del servicio (el método de Nivel I y algún o algunos otros métodos de niveles superiores), el cálculo se dará por satisfecho cuando al menos dos de los procedimientos de verificación utilizados indiquen que la fiabilidad o funcionalidad es suficiente. En todo caso será el ingeniero quien decida sobre este extremo, siempre de manera razonada.

Se reitera que la ecuación de verificación es independiente del método de cálculo que después se utilice. Una determinada ley de rotura puede usarse con los tres niveles de cálculo indicados. Las únicas diferencias estriban en la forma de establecer los parámetros, agentes y acciones que entran en la ecuación de verificación y en el criterio de aceptación del resultado que se obtiene. Por este motivo y siendo normalmente la aplicación más sencilla, se recomienda que el cálculo que siempre debe hacerse en Nivel I actúe como referencia. Esto, evidentemente, no excluye que, además, se hagan los cálculos adicionales correspondientes y los que la ROM correspondiente a cada tipo de obra (o la Parte 4 de esta ROM) recomienden correspondiendo a los Niveles II y III.

En la Parte 3 de esta ROM se incluyen detalles de un método de verificación correspondiente a cálculos de Nivel I. En el apartado 3.3.10 se indica un procedimiento de estimación de las probabilidades de fallo a partir de los resultados de esos cálculos.

El proceso general de verificación de la seguridad y el servicio de acuerdo con el método de cálculo de Nivel I se recoge esquemáticamente en la Fig. 3.3.1.

Figura 3.3.1. Esquema del proceso de evaluación de la seguridad y la funcionalidad



3.3.5 Definición de los Estados o situaciones de proyecto

Para analizar un determinado estado límite es preciso plantear para la obra o tramo de obra en estudio una geometría de la misma y del terreno, unas propiedades de los materiales, el medio físico y el terreno, y unos agentes y acciones que, en general, serán una simplificación de la realidad válida durante un cierto intervalo de tiempo durante el cual los factores de proyecto y la respuesta estructural y funcional de la obra pueden suponerse estacionarios estadísticamente; es decir, la variabilidad de los factores de proyecto puede describirse estadísticamente por funciones de probabilidad y sus correspondientes descriptores estadísticos. Estas simplificaciones se denominan estados o situaciones de proyecto.

La simplificación será tanto más grosera cuando más complejo sea el problema en estudio y menos potentes las herramientas de análisis. Los coeficientes de seguridad o el margen de seguridad que se debe adoptar serán tanto más elevados cuanto mayores sean la incertidumbre del fenómeno analizado y de los datos, así como las simplificaciones realizadas para modelar el problema.

De esta forma, la determinación de los estados o situaciones de proyecto a considerar en los cálculos se realizará analizando todas las posibles condiciones en las que se encontrará la obra durante cada una de las Fases de proyecto (Construcción, Servicio, Conservación, Reparación y Mantenimiento), considerando, cuando puedan adoptarse, valores estacionarios en sentido estadístico de los diferentes factores de proyecto: geometría, propiedades y agentes y acciones. Los estados o situaciones de proyecto se agrupan en condiciones de trabajo en función de la simultaneidad y compatibilidad de los agentes predominantes.

La duración de un estado o situación de proyecto depende de la variabilidad temporal de los factores de proyecto, incluyendo la respuesta de la obra. Atendiendo a la duración, los estados o situaciones de proyecto se clasifican en:

- ◆ Persistentes: son aquéllos que corresponden a las condiciones de uso normal de la obra y que se pueden producir durante periodos de larga duración similares a la vida útil de la obra.
- ◆ Transitorios: son aquéllos que tienen corta duración respecto a la vida útil de la obra ya sea, entre otras causas, por la geometría de la obra (Fase de Construcción), por las características del terreno (consolidación o comportamiento del mismo) o por las acciones actuantes (cargas de uso y explotación diferentes en las Fases de Reparación o Mantenimiento).
- ◆ Excepcionales: son aquéllos en los cuales algún factor de proyecto se manifiesta de una forma inesperada, accidental o extraordinaria y con una duración de actuación muy corta en relación con la Fase de proyecto considerada (Por ejemplo, el efecto de un sismo).

En cálculos de Nivel I, se recomienda que, para el análisis de los distintos modos de fallo geotécnicos asociados a cada estado o situación de proyecto en un emplazamiento determinado, se parta de una misma configuración geométrica del proyecto y de la obra, así como de unas características permanentes de los materiales, del medio físico y del terreno. De esta manera, los distintos cálculos de proyecto guardarán cierta compatibilidad y permitirán que el ingeniero tenga una visión de conjunto.

Los criterios básicos que se recomiendan para definir los estados y situaciones de proyecto y los factores que en ella actúan para verificación de los modos de fallo geotécnicos con métodos de cálculo de Nivel I se especifican en los apartados que siguen.

3.3.5.1 Definición de los parámetros geométricos

En los cálculos de Nivel I, en cada uno de los estados o situaciones de proyecto, los parámetros geométricos se considerarán de carácter permanente.

La configuración geométrica del subsuelo será la deducida de los reconocimientos geológico-geotécnicos, donde deben haber quedado claramente establecidos los distintos tipos de terreno y sus contactos. Es de espe-

cial importancia la delimitación precisa de los espesores de suelos blandos que puedan causar asientos y la representación de zonas débiles que puedan causar roturas o fallos del terreno.

Buena parte de la seguridad de la obra se decide a la hora de configurar el terreno para futuros cálculos. No es posible automatizar, con coeficientes de seguridad parciales (aumentos equivalentes de espesor de estratos blandos, aumentos ficticios de la profundidad de la roca, etc ...), el proceso de modelización del terreno. Únicamente el buen juicio y la experiencia del ingeniero podrán conducir a una representación simplificada del terreno suficientemente precisa y segura para distintos cálculos posteriores.

En aquellos casos en los que resulte desfavorable, las dimensiones geométricas de la obra se representarán por su valor nominal aumentado o disminuido en la tolerancia de construcción que se indique en el proyecto.

Tabla 3.3.1. Niveles representativos a adoptar para las aguas exteriores en función del tipo de combinación considerado

		Tipo de combinación de acciones			
		Cuasi-permanente y sísmica	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter no predominante	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter predominante	Frecuente y accidental
Nivel representativo de las aguas exteriores	Nivel Alto	Nivel global asociado a una probabilidad de no excedencia del 50% tomada del régimen medio de niveles máximos ⁽¹⁾	Nivel global máximo con un periodo de retorno de 20 años ⁽³⁾	Nivel global máximo con un periodo de retorno de 50 años ⁽⁵⁾	Nivel global asociado a una probabilidad de no excedencia del 85% tomada del régimen medio de niveles máximos ⁽⁷⁾
	Nivel Bajo	Nivel global asociado a una probabilidad de no excedencia del 50% tomada del régimen medio de niveles mínimos ⁽²⁾	Nivel global mínimo con un periodo de retorno de 20 años ⁽⁴⁾	Nivel global mínimo con un periodo de retorno de 50 años ⁽⁶⁾	Nivel global asociado a una probabilidad de no excedencia del 85% tomada del régimen medio de niveles mínimos ⁽⁸⁾

- (1) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Pleamar media (se corresponde aproximadamente a una marea con coeficiente 70) en mares con marea astronómica significativa (U.A. > 0,5 m).
 - Nivel medio del nivel del mar en mares sin marea astronómica significativa.
 - Pleamar media y nivel medio de avenida (máximos anuales) en zonas con marea astronómica significativa, sometidas a corrientes fluviales.
 - Nivel medio de avenida (máximos anuales) en corrientes fluviales no afectadas por mareas.
- (2) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Bajamar media (se corresponde aproximadamente con una mareas con coeficiente 70) en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar en mares sin marea astronómica significativa.
 - Bajamar media y nivel medio de estiaje en zonas con marea astronómica significativa, sometidas a corrientes fluviales.
 - Nivel medio de estiaje en corrientes fluviales no afectadas por mareas.
- (3) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Máxima marea astronómica +0,5 m en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar + 0,8 m en mares sin marea astronómica significativa.
- (4) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Mínima marea astronómica - 0,3 m en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar - 0,6 m en mares sin marea astronómica significativa.
- (5) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Máxima marea astronómica + 0,6 m en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar + 1,00 m en mares sin marea astronómica significativa.
 - Nivel más alto de las aguas observado localmente en corrientes fluviales afectadas o no por mareas.
- (6) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Mínima marea astronómica - 0,4 m en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar - 0,8 m en mares sin marea astronómica significativa.
 - Nivel más bajo de las aguas observado localmente en corrientes fluviales afectadas o no por mareas.
- (7) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Pleamar viva media (se corresponde aproximadamente con una marea con coeficiente 90) en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar en mares sin marea astronómica significativa.
- (8) En ausencia de datos estadísticos relevantes, simplícidamente podrán adoptarse los siguientes niveles:
- Bajamar viva media (se corresponde aproximadamente con una marea con coeficiente 90) en mares con marea astronómica significativa.
 - Nivel medio del nivel del mar en mares sin marea astronómica significativa.

La definición de los niveles de agua libre y en el terreno, el estado de agua en el terreno, la observación de los niveles piezométricos y su representación en los distintos análisis es de especial importancia en las obras marítimas y portuarias. A los efectos de la configuración geométrica de la obra y del terreno, los niveles de las aguas libres exteriores y de los niveles de saturación en terrenos naturales y rellenos que se adoptarán serán aquéllos que puedan asimilarse a los efectos de respuesta de la obra y del terreno con un carácter estacionario; es decir sin tener en cuenta las variaciones rápidas que pueden ser causadas, entre otros, por el efecto del oleaje. En este sentido podrán tomarse los niveles correspondientes asociados a periodos de medición de aproximadamente 5 minutos.

Los valores representativos de los niveles de agua serán definidos en cada estado o situación de proyecto. Para cada estado de proyecto se considerarán, normalmente, un par de niveles representativos correspondientes a nivel alto (marea alta y, en su caso, nivel de avenida) y nivel bajo (marea baja y, en su caso, nivel de estiaje) de las aguas libres exteriores, de las líneas de saturación en los terrenos y de los niveles en el interior de estructuras fijas o flotantes y sus valores compatibles y simultáneos respectivamente en los terrenos, aguas libres exteriores o estructuras, adoptando los valores de combinación que le correspondan en función del tipo de combinación y simultaneidad de factores de proyecto que se considere en la ecuación de verificación (Ver apartado 3.3.5.3). En aquellos casos en los que no se considere el nivel de agua conjuntamente con otras acciones climáticas (oleaje, corrientes, viento), formando un grupo de acciones variables dependientes, ni se considere el nivel de las aguas como acción accidental, se tomarán para los niveles de agua los valores representativos de la Tabla 3.3.1 en función del tipo de combinación considerada. El tratamiento de dichas excepciones se indicará específicamente en la ROM 0.3, así como en otras Recomendaciones correspondientes a los distintos tipos estructurales.

Los valores representativos de los niveles de las aguas libres exteriores en las distintas áreas del portuarias españolas y de las líneas de saturación compatibles con las mismas en terrenos naturales y rellenos se incluyen de igual forma en la ROM 0.3, así como en el apartado 4.2 de esta ROM.

3.3.5.2 Definición de las propiedades del terreno

Las propiedades del terreno deberán quedar representadas en cada estado o situación de proyecto por una serie de parámetros que normalmente se habrán deducido de los ensayos de campo o de laboratorio realizados durante la investigación geotécnica. En general, esos parámetros serán los mismos en cada uno de los problemas que se analicen o, al menos, guardarán entre sí la compatibilidad debida.

En los cálculos de Nivel I, en cada uno de los estados o situaciones de proyecto, las propiedades del terreno se considerarán de carácter permanente.

Se supondrá, con carácter general, que el valor representativo de las propiedades del terreno es una estimación prudente del valor medio de los resultados obtenidos en la investigación geotécnica correspondiente a la zona de afección del modo de fallo considerado, salvo que, por algún motivo debidamente justificado, el ingeniero decida optar por un valor nominal más conservador. Tales excepciones pueden darse en aquellos casos en los que la información disponible no se considere suficiente para su tratamiento estadístico o se observe una gran dispersión de resultados. Otras excepciones que puedan ser recomendables se indicarán expresamente en esta ROM, o en otras Recomendaciones de esta misma Serie.

Rara vez se obtienen todos los datos de una propiedad o parámetro geotécnico por un mismo procedimiento. Es práctica habitual recomendable determinar los parámetros geotécnicos más importantes por dos o más vías independientes y complementarias. El concluir, con toda la información disponible, sobre el valor de cálculo de un determinado parámetro tendrá, por tanto, cierta subjetividad. La experiencia y buen criterio del ingeniero son en este caso indispensables. En este proceso está involucrada parte de la seguridad final frente al problema en estudio.

Cuando exista una base estadística que permita la determinación de la función de distribución de un determinado parámetro geotécnico en un dominio espacial acotado, el valor representativo de dicho parámetro será el correspondiente al cuantil de la probabilidad de no excedencia del 5% o del 95% según resulte más desfavorable para los cálculos.

3.3.5.3 Definición de las acciones

Las acciones que hayan de considerarse en el proyecto de una determinada obra marítima y portuaria quedarán fijadas en otros documentos ROM, en otros códigos o normas específicas que le sean de aplicación, o por condiciones impuestas por la explotación. Únicamente cuando no haya información específica relativa a las acciones a considerar en un caso concreto y cuando, además, se trate de verificar un modo de fallo geotécnico, se tendrá en cuenta lo que se incluye en este apartado.

Las acciones se pueden clasificar de acuerdo con su variación temporal en el estado o situación de proyecto considerado en:

- ◆ Acciones permanentes (G).
- ◆ Acciones no permanentes o variables (Q).
- ◆ Acciones extraordinarias (A).

Las acciones directas causadas por el terreno, tales como acciones gravitatorias, presiones, empujes, acciones debidas a movimientos del terreno y demás esfuerzos tendrán la consideración de cargas permanentes ⁽¹⁾. De igual forma, las acciones cuasi-estáticas causadas por los niveles del agua, como la acción gravitatoria del agua, los empujes y subpresiones hidrostáticos ... también tendrán la consideración de cargas permanentes, independientemente del valor representativo de los niveles de agua adoptado en la combinación de acciones considerada en la ecuación de verificación. Las acciones transmitidas por el suelo por la actuación de cargas exteriores tendrán la consideración de cargas variables.

Para los cálculos de Nivel I, la definición de los agentes causantes de las acciones y, en su caso directamente las acciones, se realiza por medio de un valor nominal o, cuando exista base estadística suficiente que permita la determinación de la función de distribución, a través de un valor representativo asociado a un determinado cuantil de dicha función de distribución.

Los agentes gravitatorios, algunos agentes de uso y explotación, los debidos a la construcción y algunos agentes accidentales, en general, se cuantifican por medio de un valor nominal.

En el caso de los agentes y acciones permanentes, cuando se disponga de base estadística, el valor característico será el correspondiente al cuantil del 5% o del 95%, según resulte más desfavorable para los cálculos.

En el caso de agentes y acciones variables, en los que se disponga de base estadística suficiente, el valor característico será el correspondiente al cuantil del 2% o del 98%, según resulte más desfavorable para los cálculos, de la función de distribución, considerando un período de referencia representativo del estado o situación de proyecto. Ese periodo será generalmente igual a un año.

En el caso de acciones variables desfavorables en situaciones persistentes, considerando el año como período de referencia, equivale al valor correspondiente a un período de retorno de 50 años. En muchos casos, el valor representativo de acciones variables favorables puede simplícidamente tomarse igual a cero (no ocurrencia).

En el caso de agentes o acciones extraordinarios, entre los que se encuentra el sismo, cuando se disponga de base estadística, se adoptará como valor característico el correspondiente a una probabilidad anual de no excedencia muy alta, del orden del 99,8%, lo que equivale a periodos de retorno de 500 años.

Los coeficientes de seguridad de tipo general que se recomiendan en esta ROM para cálculos de Nivel I están definidos tomando en consideración los valores representativos de las acciones que se señalan en este aparta-

(1) Para la verificación de modos de fallo estructurales mediante cálculos de Nivel I, las acciones causadas por el terreno pueden tener otro tipo de consideraciones.

do. Si en alguna aplicación concreta resultara que los valores nominales o característicos de las acciones hubieran sido determinados con criterios claramente diferentes, deberán introducirse las modificaciones necesarias para obtener valores que obedezcan a criterios similares a los indicados o bien recurrir a un estudio de los coeficientes de ponderación de las acciones y del coeficiente de seguridad adecuado a cada caso.

Comentario: El caso mencionado al final del párrafo precedente puede darse en aquellas obras en que por criterios de optimización económica, teniendo en cuenta el ISA correspondiente, no pueden admitirse probabilidades de ocurrencia de los modos de fallo geotécnicos similares a las recogidas con carácter general en esta ROM. En estos casos, los modos de fallo geotécnicos se considerarán como modos de fallo principales. Algunos de ellos serán estadísticamente dependientes entre sí, al ser debidos a la misma causa y ser formas diferentes de aproximarse a un único fallo (rotura del terreno). La probabilidad de fallo admisible de la obra y de cada uno de los modos de fallo geotécnicos deben definirse de forma adecuada a cada caso y no de la forma general que se hace para otro tipo de obras. Como consecuencia, el valor representativo de la acción y los coeficientes parciales correspondientes deben ser específicos de cada proyecto. En esta ROM se destacan las tipologías de obras marítimas y portuarias en las que esta definición de la acción debe ser específica, así como los coeficientes de seguridad mínimos asociados.

3.3.5.4 Definición de las combinaciones de acciones y demás factores de proyecto

La participación en la ecuación de verificación de los diferentes factores de proyecto y sus respectivos valores se establecerá para ciertas combinaciones que se concretan para tener en cuenta tanto su simultaneidad como su compatibilidad. Los criterios o procedimientos de combinación quedan reflejados en la ROM 0.0. Con estos criterios se deben definir los detalles de cálculo que corresponden a cada obra marítima y portuaria.

Los documentos ROM definirán, para cada tipo de obra concreta, cuáles son las combinaciones de acciones que deben utilizarse para la verificación de la fiabilidad, funcionalidad y operatividad de las obras marítimas y portuarias. Lo que se señala a continuación es únicamente aplicable al estudio de los modos de fallo geotécnicos y siempre que en algún otro documento ROM más específico no se haya establecido el criterio de combinación correspondiente.

En las últimas décadas se ha venido produciendo una aproximación en los métodos de Nivel I entre el campo geotécnico y el estructural, de manera que hoy se considera conveniente modificar lo que se decía por la ROM 0.5-94 en lo que respecta a la forma de obtener los efectos de las acciones en la ecuación de verificación para calcular el coeficiente de seguridad (o el margen de seguridad) correspondiente.

FRENTE A ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS (ELU)

Para verificar la seguridad frente a Estados Límite Últimos, en el campo estructural basta con considerar los siguientes tres tipos de combinaciones de acciones:

- ◆ Combinaciones fundamentales o características para estados o situaciones de proyecto persistentes o transitorias.
- ◆ Combinaciones accidentales para estados o situaciones de proyecto excepcionales.
- ◆ Combinaciones sísmicas para estados o situaciones de proyecto excepcionales con sismo.

En el campo geotécnico y debido al peso de la práctica pasada del cálculo con tensiones admisibles, se utiliza también la siguiente combinación de acciones:

- ◆ Combinación cuasi-permanente.

En esta nueva versión de la ROM 0.5 se recomienda mantener estas ideas, aunque después se maticen algunos detalles. Como consecuencia, para la verificación de los modos de fallo geotécnicos adscritos a estados lími-

te últimos se considera conveniente considerar, además de los tipos de combinación correspondientes a los cálculos estructurales, una combinación adicional, denominada cuasi-permanente y que en el dominio estructural únicamente se utiliza para comprobar Estados Límite de Servicio.

El motivo de mantener esta combinación estriba fundamentalmente en conservar un rasgo del anterior cálculo geotécnico en el que se obligaba, con un coeficiente de seguridad amplio, a que la situación de rotura estuviese “suficientemente lejos” de la situación media de mayor duración (combinación cuasi-permanente).

Por tanto, en los cálculos de Nivel I, la comprobación de los modos de fallo geotécnicos adscritos a un Estado Límite Último debe realizarse para las siguientes combinaciones de acciones, sin perjuicio que la ROM correspondiente a cada tipo de obra indique un criterio diferente:

1. Combinación cuasi-permanente

Esta combinación esta formada por todas las acciones permanentes que actúan sobre la obra y el terreno, y los valores cuasi-permanentes de las cargas variables simultáneas y compatibles, que se obtienen multiplicando los valores nominales o característicos de las mismas por un factor de compatibilidad Ψ_2 . Simbólicamente, esta combinación se puede representar por la fórmula siguiente:

$$G + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 1 \text{ y } n$$

donde:

- G = acciones permanentes.
- Q_i = acciones variables de actuación simultánea.
- $\psi_{2,i}$ = coeficiente de compatibilidad cuasi-permanente.

En términos generales, esta combinación intenta representar el valor medio de las acciones durante el intervalo de tiempo asociado al estado o situación de proyecto considerado.

2. Combinaciones fundamentales o características

Esta combinación toma en consideración la actuación simultánea de varias acciones variables con valores compatibles en la ocurrencia del modo de fallo. De esa forma, la acción variable principal o predominante en la ocurrencia del modo de fallo y sus acciones directamente dependientes de la misma intervienen con su valor característico; y el resto de acciones variables simultáneas y compatibles con sus valores de combinación fundamentales, que se obtienen multiplicando los valores nominales o característicos de las mismas por un factor de compatibilidad ψ_0 . Simbólicamente, esta combinación se puede representar por la fórmula siguiente:

$$\gamma_g \cdot G + \gamma_{q,1} \cdot Q_1 + \sum \psi_{0,i} \cdot \gamma_{q,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 2 \text{ y } n$$

donde:

- G = acciones permanentes.
- Q_1 = acción variable principal o predominante en la ocurrencia del modo de fallo y acciones variables de actuación simultánea directamente dependientes de la predominante.
- Q_i = otras acciones variables de actuación simultánea compatibles con la predominante e independientes estadísticamente de la misma.
- $\psi_{0,i}$ = coeficiente de compatibilidad fundamental o característico.
- γ_g, γ_q = coeficientes de ponderación parciales.

De todas las combinaciones fundamentales o características, es decir, para cada acción variable que puede tomar el carácter de predominante, el ingeniero podrá eliminar aquéllas que, justificadamente, provoquen en el terreno sollicitaciones menos peligrosas que otras combinaciones incluidas en su consideración.

3. Combinaciones accidentales

Cuando en la verificación del modo de fallo se considere la actuación de una acción extraordinaria, sea o no accidental, con una probabilidad de presentación muy baja durante el intervalo considerado y, a la vez, con un periodo de actuación corto, el valor de compatibilidad de las acciones variables que actúan de forma simultánea debe ser claramente menor.

Para cada acción excepcional que pueda presentarse, existirá una combinación accidental que puede formularse en los términos siguientes:

$$G + A + \psi_1 \cdot Q_1 + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 2 \text{ y } n$$

donde:

- G = acciones permanentes.
- A = acción extraordinaria.
- Q_1 = acción variable principal o predominante en la ocurrencia del modo de fallo y acciones variables de actuación simultánea directamente dependientes de la predominante.
- Q_i = otras acciones variables de actuación simultánea compatibles con la predominante e independientes estadísticamente de la misma.
- ψ_1 = coeficiente de compatibilidad frecuente.
- $\psi_{2,i}$ = coeficientes de compatibilidad cuasi-permanente.

No se considerará la actuación de acciones excepcionales y, por tanto, las combinaciones accidentales en estados o situaciones de corta duración, así como en obras provisionales, siempre que su vida útil sea inferior a un año.

4. Combinaciones sísmicas

Cuando en la verificación de un modo de fallo se considere la actuación de la acción sísmica, con una probabilidad de presentación muy baja y con un periodo de actuación muy corto respecto a la duración del estado o situación de proyecto considerada, el valor de compatibilidad de las acciones variables que actúan de forma simultánea debe ser claramente menor; no debiéndose diferenciar el valor de compatibilidad de la acción variable principal predominante del resto de acciones variables. Simbólicamente esta combinación se puede representar por la fórmula siguiente:

$$G + S + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 1 \text{ y } n$$

donde:

- G = acciones permanentes.
- S = acción sísmica.
- Q_i = acciones variables de actuación simultánea.
- $\psi_{2,i}$ = coeficiente de compatibilidad cuasi-permanente.

En términos generales, esta combinación intenta tomar en consideración que el valor de compatibilidad de las acciones variables a considerar cuando actúa el sismo es aproximadamente el valor medio de las acciones durante el intervalo de tiempo asociado al estado o situación de proyecto considerado.

Los coeficientes de compatibilidad tienen el siguiente significado:

- ◆ $\psi_0 Q$: Valor de combinación fundamental de la acción o valor de compatibilidad de una acción variable cuando actúa de forma simultánea con otra acción variable predominante en la ocurrencia del modo de fallo e independiente estadísticamente de la misma. Se determina de tal forma que la probabilidad de que

los valores del efecto de la acción combinada con la predominante sean excedidos es aproximadamente similar a la probabilidad de que el efecto de la acción predominante sea excedido. En el caso de dos acciones incompatibles el valor de ψ_0 es igual a 0,00. En el caso de dos acciones completamente dependientes el valor de ψ_0 es 1,00.

- ◆ ψ_1Q : Valor de combinación frecuente de la acción. Este valor no es excedido durante un periodo de tiempo grande respecto a la duración del estado o situación de proyecto considerado.

Comentario: Cuando se disponga de base estadística suficiente, puede adoptarse como valor de combinación frecuente de una acción variable de origen climático el asociado a una probabilidad de no excedencia del 85%, tomada del régimen medio que le corresponda.

- ◆ ψ_2Q : Valor de combinación cuasi-permanente de la acción. Este valor es excedido durante un periodo de tiempo grande respecto a la duración del estado o situación de proyecto considerado. Cuando se disponga de base estadística suficiente, puede adoptarse como valor de combinación cuasi-permanente de una acción variable el asociado a una probabilidad de no excedencia del 50% tomada del régimen medio que le corresponda. Este valor representa el valor medio de la acción durante el intervalo de tiempo asociado al estado o situación de proyecto considerado.

Por tanto, con esa definición, los valores de los coeficientes ψ dependen del agente que causa la acción variable considerada y deben buscarse en los correspondientes códigos de acciones o en las ROM de la Serie 0. A falta de otros datos, simplícidamente pueden tomarse los definidos en la ROM 0.0.

FRENTE A ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO (ELS)

En los cálculos de Nivel I, para verificar los modos de fallo adscritos a Estados Límite de Servicio se utilizarán las siguientes combinaciones de acciones:

- ◆ *Combinación poco frecuente:*

$$G + Q_1 + \sum \psi_{0,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 2 \text{ y } n$$

- ◆ *Combinación frecuente:*

$$G + \psi_1 \cdot Q_1 + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 2 \text{ y } n$$

- ◆ *Combinación cuasi-permanente:*

$$G + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i \quad \text{para } i \text{ entre } 1 \text{ y } n$$

donde:

G = acciones permanentes.

Q_1 = acción principal o predominante en la ocurrencia del modo de fallo y acciones variables de actuación simultánea directamente dependientes.

Q_i = otras acciones variables de actuación simultánea compatibles con la predominante e independientes estadísticamente de la misma.

$\psi_{0,i}$ = coeficientes de compatibilidad fundamentales.

ψ_1 = coeficiente de compatibilidad frecuente.

$\psi_{2,i}$ = coeficientes de compatibilidad cuasi-permanentes.

Los diferentes documentos ROM, así como las normas, instrucciones y recomendaciones específicas que sean de aplicación, fijarán las condiciones de verificación de cada modo de fallo adscrito a un Estado Límite de Servicio, indicando el tipo de combinación de acciones aplicable.

En general, en los cálculos de Nivel I, la combinación de acciones cuasi-permanentes será la utilizada para la verificación de asientos a largo plazo y para la comprobación de otros modos de fallo geotécnicos adscritos a Estados Límite de Servicio.

3.3.5.5 Consideración de Estados o situaciones de corta duración

Tal como se ha mencionado en los apartados precedentes, los valores de cálculo de las acciones variables y accidentales son formalmente dependientes de la duración de la situación de proyecto considerada. En el caso del proyecto geotécnico existe una situación específica relativa a la consolidación del terreno que conviene considerar de forma explícita.

La aplicación de cargas y, en general, cualquier sollicitación que actúe sobre un terreno saturado produce ciertas variaciones en la presión intersticial. En algunas ocasiones, que se detallarán a lo largo de esta ROM, es recomendable suponer que el terreno no drena y que, durante un cierto plazo, se mantiene constante la presión intersticial generada por los diversos agentes considerados.

El plazo correspondiente a estas situaciones “sin drenaje” debe ser estimado por el ingeniero y, además si fuese preciso, también los valores representativos de las acciones correspondientes a la duración estimada del plazo en el que no se produce consolidación apreciable.

Normalmente la duración de esta situación es corta cuando se compara con la vida útil de la obra y, en consecuencia, a efectos de definir el estado o situación de proyecto en el que verificar los distintos modos de fallo, puede considerarse como una situación transitoria.

Pueden existir también situaciones de corto plazo reales que se producen durante el proceso de construcción, de manera temporal, y que requieren también la adecuación correspondiente de los valores de cálculo de las acciones.

Los valores nominales o característicos de las acciones variables que puedan considerarse compatibles y simultáneas en este tipo de situaciones habrán de ser decididas por el ingeniero. Como norma general, cuando no se quiera reducir la fiabilidad, deberán utilizarse valores de las acciones variables que tengan una probabilidad de excedencia, durante el periodo que dura la situación transitoria, del mismo porte que el valor de la probabilidad de excedencia correspondiente a los valores adoptados en la vida útil.

Comentario: La relación entre la probabilidad de excedencia de una acción variable, n , durante una Fase de proyecto de duración L y su periodo de retorno, T_R , viene dada por la expresión:

$$p_{n,L} = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_R} \right)^L$$

Como se ha adoptado como valor característico de las acciones variables para Fase de Servicio el correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, la probabilidad de excedencia de la acción oscila entre 0.63, para duraciones de la Fase de Servicio (vida útil, V) de 50 años y 0.26 para las de 15 años. Por lo tanto, el valor característico de las acciones en situaciones transitorias de duración L puede calcularse a partir de la anterior formulación, asociándolo al periodo de retorno que, para el tiempo que duren tales situaciones, de lugar a una probabilidad de excedencia similar a las antes citadas para la Fase de Servicio. En consecuencia, a efectos prácticos podrá adoptarse como valor característico de una acción variable en fase transitoria el correspondiente a un periodo de retorno de un mismo orden de magnitud que el de la duración de dicha fase, comprendido entre un máximo asintótico de $T_R = 50L/V$ (para las situaciones transitorias más prolongadas posibles en relación con la Fase de Servicio) y el doble de dicho ratio (para los casos de transitoriedad menos prolongada) con un valor mínimo de 2 años.

Por otro lado, el carácter de la obra, en alguna de estas Fases transitorias, puede ser diferente del carácter general y, en consecuencia, puede ser conveniente un estudio específico de la fiabilidad exigible en esas circunstancias.

Para verificar la seguridad frente a Estados Límite Últimos se adoptará la combinación fundamental de acciones. En general, no se considera necesario suponer la actuación de acciones excepcionales o accidentales durante estados o situaciones de corto plazo.

3.3.6 Coeficientes de ponderación parciales de las acciones

Para verificar modos de fallo correspondientes a Estados Límite Últimos mediante los cálculos de Nivel I establecidos en esta ROM, se introducen en las acciones, al combinarlas, coeficientes de ponderación parciales en la forma que se indica en 3.3.5.4.

Tal como se señala en ese apartado, los coeficientes de ponderación de las acciones sólo se considerarán en las combinaciones fundamentales o características. En las combinaciones cuasi-permanentes, las accidentales y las sísmicas no se consideran coeficientes de ponderación de las acciones.

La mayoración de acciones para el caso de combinaciones fundamentales se realizará con coeficientes distintos según el tipo de agente causante de la acción, de su clasificación temporal (permanente o variable), de su sentido de participación en la ocurrencia del modo (favorable o desfavorable), así como del tipo de modo de fallo considerado.

En la Tabla 3.3.2. se indican los coeficientes de ponderación parciales de las acciones recomendados en esta ROM para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos.

Tabla 3.3.2. Coeficientes de ponderación parciales* de las acciones para la verificación de modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos (ELU). Combinaciones fundamentales.

Acción	Símbolo	Tipo de modo de fallo				
		EQU	STR	GEO	UPL	HYD
Permanente						
Desfavorable	γ_g	1,10	1,35	1,00	1,00	1,35
Favorable		0,90	1,00	1,00	0,90	0,90
Variable						
Desfavorable	γ_q	1,50	1,50	1,30	1,50	1,50
Favorable		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(*) Estos coeficientes no son de aplicación en aquellas obras en que por criterios de optimización económica no puedan admitirse probabilidades de ocurrencia de los modos de fallo geotécnicos similares a las consideradas con carácter general en esta ROM (p.e. en los diques de abrigo). Ver comentario del apartado 3.3.5.3

3.3.7 Coeficientes de minoración parciales de las resistencias del terreno

Aunque las versiones actuales de algunas normativas y de varios trabajos de investigación en el campo de la geotecnia apuntan como procedimiento de futuro el cálculo sistemático con parámetros resistentes del terreno minorados, en esta ROM se adopta el criterio de no minorarlos por una cuestión de prudencia, al considerar que en la actualidad todavía no hay experiencia acumulada suficiente sobre los resultados a los que conduce dicha minoración y su influencia en la definición de los coeficientes o márgenes de seguridad mínimos exigidos para la verificación de los distintos modos de fallos geotécnicos. Por tanto en esta Recomendación no se utilizan coeficientes de minoración parciales en las resistencias del terreno (Ver justificación en el apartado 1.4).

Sin embargo, siempre es posible, con cierto rigor, minorar la resistencia final o, lo que es equivalente, exigir un coeficiente de seguridad mínimo adecuado cuando se compare el efecto de las acciones con la resistencia del terreno.

3.3.8 Coeficientes de seguridad

En general, en esta Recomendación la ecuación de verificación de la seguridad de una obra o tramo de la misma ante un modo de fallo geotécnico se formula en términos de coeficiente de seguridad, considerando acciones mayoradas y resistencias no minoradas:

$$F = R/E_d > F_m$$

especificándose en cada circunstancia el coeficiente de seguridad mínimo, F_m , que debe alcanzarse.

La seguridad queda verificada cuando el coeficiente de seguridad calculado supera el umbral F_m que se define específicamente para cada modo de fallo analizado. A su vez, para cada modo de fallo analizado este coeficiente de seguridad depende adicionalmente del carácter de la obra, del tipo de estado o situación de proyecto atendiendo a su duración y del tipo de combinación de acciones considerados.

3.3.8.1 Coeficientes de seguridad mínimos

En general, en esta Recomendación para la verificación de cada modo de fallo geotécnico concreto se definirá específicamente la ecuación de verificación correspondiente así como tres coeficientes de seguridad global claramente diferentes asociados a la misma, dependiendo del tipo de estado o situación de proyecto y del tipo de combinación de acciones consideradas, según se indica en la Tabla 3.3.3.

Tabla 3.3.3. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para la verificación de modos de fallos geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos. $5 \leq ISA \leq 19$.

Situación de Proyecto	Combinación de acciones	Coeficiente de seguridad exigible, F
Persistente	Cuasi-permanente	F_1
	Fundamental	F_2
Transitoria (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo)	Cuasi-permanente	F_1 o F_2
	Fundamental	F_2 o F_3 (ver texto)
Excepcional	Accidental sin sismo	F_3
	Sísmica	F_3

En un estado o situación persistente y para la combinación cuasi-permanente, el coeficiente de seguridad debe ser alto para alejar la rotura y procurar que el cimiento de la obra funcione en régimen elástico normalmente.

Para estos mismos estados o situaciones pero para las combinaciones fundamentales, cuando ya actúan acciones variables con valores altos (mayorados), lógicamente el coeficiente de seguridad adoptado debe ser menor ($F_2 < F_1$).

Para situaciones excepcionales es práctica habitual considerar que la obra casi alcanza el fallo cuando actúa el valor nominal o característico de la acción. Normalmente F_3 tendrá un valor próximo a la unidad. El valor recomendado será menor que los dos anteriores, $F_3 < F_2$.

Para las situaciones transitorias o de corta duración definidas en 3.3.5.5 pueden utilizarse valores de F_1 y F_2 iguales que para los estados o situaciones persistentes, considerando en la determinación del valor de las acciones la duración de esa situación. No obstante, si se llegaran a utilizar los mismos valores representativos de las acciones que los que corresponden a situaciones persistentes, los coeficientes de seguridad pueden reducirse algo, sustituyéndose el valor F_1 por el F_2 , para las combinaciones cuasi-permanentes, y el valor F_2 por el F_3 , para las combinaciones fundamentales, para tener en cuenta este hecho.

Los valores de estos coeficientes que se incluyen, con carácter general y siempre que no se señale otra cosa, en esta ROM pueden considerarse asociados con probabilidades de ocurrencia del fallo muy bajas (del orden de 10^{-3}) durante la Fase de proyecto considerada, que son las asignadas en esta ROM a los fallos geotécnicos en obras de ISA bajas (entre 5 y 19). Esto permite que, adoptando en el cálculo estos coeficientes de seguridad, los modos de fallo geotécnico podrán, en muchos casos, no ser considerados como modos de fallo principales y, por tanto, despreciarse su contribución en el cálculo de la probabilidad global de fallo de acuerdo con lo dispuesto en el apartado 3.2.1.

Cuando el coeficiente de seguridad de alguna aplicación específica de esta ROM esté asociado con otra probabilidad de fallo se indicará expresamente el apartado correspondiente, así como los criterios adoptados en ese caso para la definición de los factores de proyecto y, en particular, para la definición de los valores característicos y de cálculo de las acciones que intervienen en la ecuación de verificación.

3.3.8.2 Coeficientes de seguridad mínimos asociados con otras probabilidades de fallo

A través de la aplicación de métodos de cálculo de Niveles II y III puede relacionarse el coeficiente de seguridad mínimo exigible para la verificación de un modo de fallo con la probabilidad de ocurrencia del mismo.

Simplificadamente, para ciertos rangos del índice de fiabilidad y a igualdad de la duración de la Fase de proyecto y de otros factores de incertidumbre como la intensidad de la investigación geotécnica, puede aceptarse como hipótesis una distribución normal del logaritmo del coeficiente de seguridad. Esta hipótesis lleva a concluir que el coeficiente de seguridad mínimo que debe exigirse para cualquier tipo de combinación F_i ($i = 1, 2, 3$), que aquí se denomina abreviadamente F , depende exponencialmente del índice de fiabilidad requerido y, en consecuencia, puede escribirse:

$$F = F_0 \cdot \exp [\zeta (\beta - \beta_0)] \geq 1$$

donde:

- F_0 = coeficiente de seguridad asociado con un índice de fiabilidad β_0 .
- F = coeficiente de seguridad asociado con un índice de fiabilidad β .
- ζ = desviación típica de $\ln F$.

El uso de esta expresión debe limitarse a diferencias $|\beta - \beta_0| \leq 0,7$ pues su error crece con ese valor.

Sobre el valor de ζ , que depende, entre otros factores, del modo de fallo considerado, pueden verse detalles en el apartado 3.3.10.

Comentario: A título orientativo puede usarse el siguiente valor:

$$\zeta = 0,15 F_1 - 0,10$$

donde F_1 es el coeficiente de seguridad mínimo exigible en combinaciones cuasi-permanentes para el modo de fallo en cuestión en obras de carácter ISA bajo (5 a 19) y que puede consultarse en las tablas correspondientes a lo largo del texto.

Por tanto, si los valores mínimos exigibles de F quedan establecidos para una determinada fiabilidad pueden calcularse, dentro de cierto margen, los correspondientes a cualquier otra fiabilidad o probabilidad, de fallo.

3.3.9 El cálculo con modelos numéricos

En esta ROM se describen soluciones analíticas para la mayoría de los problemas que se plantean en la geotecnia marítima y portuaria. Esto es posible gracias a ciertas simplificaciones.

Para cada solución (o método de cálculo) se define no sólo el procedimiento operativo sino también el valor o los valores de los coeficientes de seguridad asociados al método.

Existe hoy la posibilidad de utilizar modelos matemáticos más complicados que los que aquí se exponen. Está próximo el día en que tales modelos hagan olvidar las fórmulas que con tanto esfuerzo prepararon los geotécnicos que nos precedieron y que forman hoy el cuerpo de esta ROM. Es más, prácticamente todos los proyectos actuales utilizan ya, en mayor o menor medida, modelos numéricos que sustituyen, a veces indebidamente, a las fórmulas y métodos sencillos que aquí se plantean.

Es bueno que se usen modelos numéricos complejos. Aquí, en las páginas de esta ROM, se puede ver escrito que tales modelos se recomiendan para resolver situaciones de cálculo que no pueden abordarse con precisión de otra manera. Es bueno que, además, se utilicen modelos complejos, incluso en problemas sencillos, que podrían abordarse sin su uso. De esta forma se gana en experiencia y se obtiene una mayor información respecto al problema objeto de estudio.

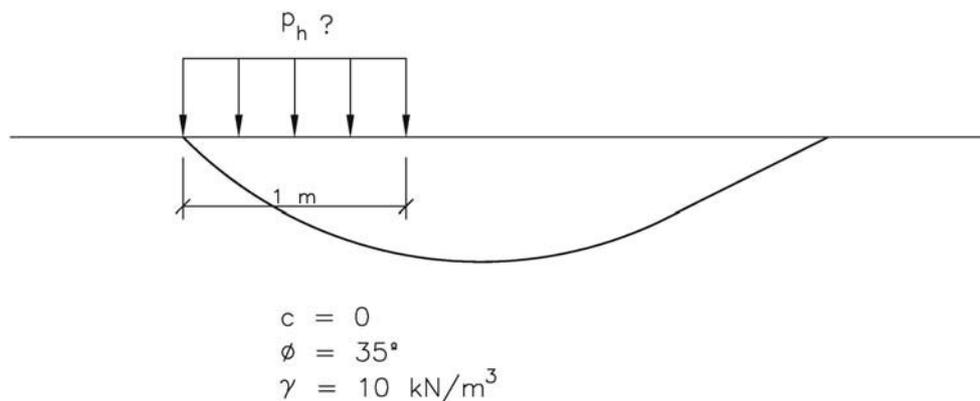
No existía, en la ROM 0.5-94, ninguna recomendación específica relativa a las precauciones necesarias para utilizar modelos numéricos. Hoy, cuando el uso de estos nuevos métodos comienza a extenderse, conviene indicar unas instrucciones mínimas.

PROGRAMAS DE CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

Estos programas son, de entre los que se utilizan en geotecnia, los mejor desarrollados. Ya quedan lejos aquellas versiones que presentaban fallos de convergencia al resolver la ecuación matemática básica de la estabilidad.

No existen problemas importantes cuando estos programas se usan para resolver problemas de equilibrio global pero sí que se plantean situaciones erróneas cuando se pretende aplicarlos a calcular situaciones de carga de hundimiento. En este aspecto concreto el error de estos modelos numéricos puede ser excesivo. Pequeños cambios en la línea de rotura que ha de tantearse y/o en las direcciones de los empujes entre rebanadas conducen a resultados que pueden quedar del lado de la seguridad o de la inseguridad, sin que esto pueda saberse a priori con algún procedimiento discriminatorio sencillo. Incluso la elección del número de rebanadas, que el usuario ha de elegir, puede modificar el resultado en sentido no predecible fácilmente.

Ante este problema, se recomienda al ingeniero que haya de usar algún programa comercial que, antes de dar crédito a los coeficientes de seguridad que resultan del cálculo, conozca bien el programa y que resuelva con él casos simples de solución bien conocida, como podría ser el que se indica en el croquis adjunto.



Para este problema, cuya solución es $p_h = 226 \text{ kN/m}^2$ según la fórmula sencilla aproximada de esta ROM, se debería obtener un coeficiente de seguridad $F = 1$. El ingeniero debe plantear este tipo de problemas previos para obtener confianza (y transmitirla) en estas aplicaciones.

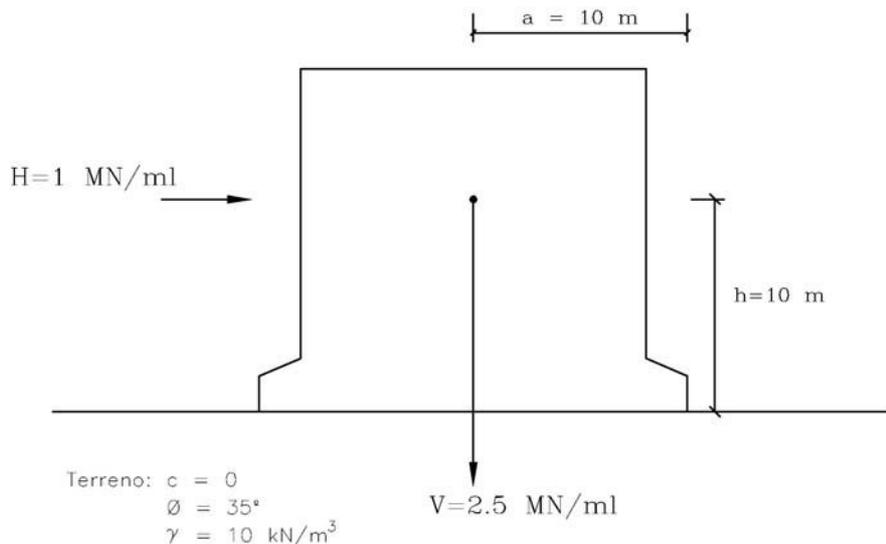
Los programas de cálculo de estabilidad de taludes dan siempre como resultado el coeficiente de seguridad al “deslizamiento del talud” que es el número por el que han de dividirse todos y cada uno de los parámetros c y $\text{tg } \phi$ que figuran en los datos de entrada para obtener el equilibrio estricto.

Para problemas de carga de hundimiento conviene, sin embargo, hacer otro tipo de cálculo. Se debe aumentar la carga que provoca el hundimiento de manera que sus dos componentes crezcan de manera homotética hasta que resulte $F = 1$.

Cuando esto ha ocurrido (equilibrio estricto), el coeficiente de seguridad frente a hundimiento es el factor por el que hubo que mayorar las cargas para conseguirlo.

El mecanismo del vuelco plástico, de igual forma, puede resolverse mediante el uso de programas de cálculo de estabilidad de taludes. Basta con definir la geometría del problema y sus acciones y calcular el coeficiente de seguridad correspondiente que da, para esa situación, el programa de cálculo. Después se irá aumentando paulatinamente la componente horizontal de la resultante de las acciones y aumentando en consonancia la excentricidad (reducción del ancho efectivo de la cimentación) hasta alcanzar el equilibrio estricto ($F = 1$). El valor por el que haya habido que multiplicar la componente horizontal de la resultante de las acciones es el coeficiente de seguridad al vuelco plástico.

Como contraste, el ingeniero debe plantearse problemas sencillos como el del croquis adjunto para comprobar que su solución coincide o se aproxima a la que se conoce por otros procedimientos.



Solución analítica según esta ROM: $N_\gamma = 45,2$ para $\phi = 35^\circ$
Coeficiente de seguridad al hundimiento

$$F_h = 2 \cdot \gamma \cdot N_\gamma \frac{(V \cdot a - H \cdot h)^2 (V - H)^3}{V^6} = 2,81$$

Coeficiente de seguridad al vuelco plástico

$$F_v = \frac{V}{H} \left[1 - 5 \sqrt{\frac{V}{2 \cdot \gamma \cdot N_\gamma \cdot a^2}} \right] = 1,28$$

(para $a = h$)

MODELOS NUMÉRICOS EN PRESIONES TOTALES

Los modelos numéricos de tipo general (problemas tensión-deformación) suelen plantear la mecánica (o la dinámica) del problema mediante ecuaciones escritas en términos de presiones (o tensiones) totales. Esto es un inconveniente grave que limita notablemente la aplicación a problemas marítimos y portuarios en los que la presencia del agua no puede omitirse.

Existe una posibilidad, a pesar de ello, de resolver problemas en los que el agua está en situación hidrostática (quieta, sin movimiento) e incluso aquéllos en los que el agua está en régimen estacionario, con una distribución espacial de presiones constante en el tiempo.

En esas condiciones (flujo estacionario) es posible fijar un plano arbitrario de referencia, normalmente el plano de agua libre (nivel medio del mar) y suponer que el peso del terreno y de la estructura ubicados por debajo de ese nivel es el peso sumergido, mientras que por encima es el peso aparente o el saturado (según corresponda).

Las diferencias de presión de agua sobre ese nivel deben considerarse después, explícitamente, como acciones. Este mismo procedimiento es el que se detalla con bastante extensión en el cálculo de empuje sobre muros que puede verse en el apartado 3.7 de esta ROM.

En la experiencia de la aplicación de la ROM 0.5-94 durante esta última década, los problemas más importantes encontrados en los proyectos afectos a Puertos del Estado han radicado precisamente en la forma de aplicar estos excesos de presión en los modelos numéricos formulados en presiones totales.

Con los modelos numéricos no es necesario recurrir a la metodología de “modos de fallo” para analizar la seguridad, pues es el propio modelo el que puede indicar cuál es el modo de fallo más crítico. El hecho de que esto no sea necesario no quiere decir que no sea conveniente hacerlo.

Siempre que se utilice un método numérico complejo se debe procurar, mediante su uso y como a continuación se dirá, el cálculo de los coeficientes de seguridad frente a los modos de fallo más habituales que se mencionan en esta ROM. Ese cálculo debe ser doble: siguiendo los procedimientos sencillos que se indican en la ROM, por un lado, y utilizando el modelo numérico, por otro lado.

Para calcular con un modelo numérico el coeficiente de seguridad frente a hundimiento de cimentaciones superficiales, es preciso suponer que la cimentación queda reducida a su ancho efectivo B^* . Esto es conservador, pero es la práctica habitual en la que se basan los coeficientes de seguridad que se recomiendan en esta ROM. El cálculo con elementos junta cimiento-estructura con resistencia limitada también puede realizarse, pero deben tomarse precauciones especiales para confirmar que no se generan tracciones efectivas.

Para calcular con modelos numéricos el coeficiente de seguridad al vuelco plástico, se aumentará la componente horizontal de las acciones y se disminuirá el ancho efectivo de forma compatible hasta que se alcance la rotura.

El cálculo con modelos numéricos del coeficiente de seguridad correspondiente a la estabilidad global es más simple, pues en general bastará con una reducción simultánea de c y $\text{tg } \phi$ en todos los materiales hasta que se produzca la rotura. Algunos programas comerciales realizan esta operación de manera automática.

Con los modelos numéricos es posible definir, por lo tanto, en los problemas de cimentaciones superficiales, los cuatro coeficientes de seguridad básicos: el equilibrio global, el hundimiento, el vuelco plástico y, aunque no se haya descrito en estos párrafos porque es obvio, también el deslizamiento según el plano de apoyo.

El ingeniero debe comprobar que su programa es adecuado para este tipo de problemas resolviendo previamente problemas sencillos similares que tengan una solución conocida. Por ejemplo los planteados en el punto anterior.

El modelo de comportamiento del suelo, en cuanto a rotura, puede ser el que el ingeniero vea más conveniente aunque, dada la amplia experiencia que se tiene con el modelo de Mohr-Coulomb, no conviene omitir esta opción en los cálculos que se puedan realizar.

En las obras portuarias existen suelos blandos que dan lugar a asientos (movimientos) importantes. Cuando el modelo considera los cambios geométricos para actualizar las coordenadas de los puntos que definen la malla suelen producirse problemas locales de convergencia; los métodos actuales de segundo orden (grandes deformaciones) no están aún suficientemente bien desarrollados y, en consecuencia, se recomienda no usarlos para simular Estados Límite Últimos salvo que se tenga una buena experiencia en ello.

La formulación de la plasticidad con el modelo de Mohr-Coulomb exige la definición de un ángulo de dilatación Ψ , que suele ser claramente menor que el ángulo ϕ de rozamiento interno.

Para aquellos casos en los que no se tenga información se recomienda suponer $\Psi = 0$.

La respuesta de varios programas comerciales a un aumento del ángulo de dilatación es diferente y por eso el ingeniero debe contrastar este aspecto, pues la hipótesis anterior ($\Psi = 0$) puede conducir a resultados innecesariamente situados del lado de la seguridad.

Los modelos numéricos complejos no resuelven aún bien las situaciones de rotura. Desde que en los años 60 se formulara el primer método de elementos finitos aplicado a la ingeniería civil (precisamente para resolver un problema geotécnico) no se ha encontrado una formulación adecuada para simular bien la rotura. Los métodos de equilibrio límite (programas de estabilidad de taludes) parecen dar aún hoy soluciones más fiables que los modelos complejos tensión-deformación.

MODELOS NUMÉRICOS EN PRESIONES EFECTIVAS

No cabe duda respecto al futuro del cálculo geotécnico; los modelos numéricos habrán de resolver el problema acoplado flujo-deformación. Esto requerirá formular los problemas geomecánicos en términos de presiones efectivas. La presión del agua intersticial aparecerá como variable dominante en muchos problemas marítimos y portuarios, particularmente en aquéllos en que el oleaje y otras oscilaciones del mar sean el agente predominante en el modo de fallo.

El proceso de flujo es complejo pues en él conviven dos mecanismos principales: la generación de presiones de agua debida a los cambios volumétricos del suelo y de la propia agua, y la disipación de presiones (o atenuación) debida al movimiento del agua dentro del suelo desde las zonas de mayor potencial a las zonas de menor potencial.

Los modelos numéricos en presiones efectivas quedan hoy lejos de estar contrastados con la realidad, al menos de forma amplia y general. Por eso su utilización debe realizarse con un apoyo razonable en cálculos desacoplados (tensiones totales).

PROBLEMAS DINÁMICOS

Al añadir la inercia y el amortiguamiento en los problemas estáticos, el problema se complica notablemente. La información necesaria para resolver estos problemas numéricos es, en general, de manipulación matemática difícil. Ver apartado 3.10.

En estos casos es conveniente utilizar modelos en presiones totales para centrar el problema, resolver de forma aproximada el efecto del agua en los parámetros de resistencia y deformación y repetirlos, de manera iterativa, hasta encontrar una solución compatible con la información disponible.

Aunque los modelos numéricos complejos puedan ser el futuro del cálculo geotécnico en obras marítimas y portuarias, hoy aún es recomendable utilizar, dentro de las opciones posibles, los menos complejos y operarlos

con parámetros convenientes, que deben decidirse en función del propio resultado, lo que requerirá cálculos iterativos, adecuadamente dirigidos.

Si un problema geotécnico no tiene solución precisa con alguno de los procedimientos indicados en esta ROM, que pueden abordarse con hojas de cálculo o con programas de ordenador sencillos, es que no existe posibilidad de precisar mucho más la solución. El ingeniero no debe buscarla utilizando métodos más complicados, sino mejorando los datos de partida y el entendimiento necesario del problema para poder simplificarlo.

3.3.10 La fiabilidad en geotecnia

El coeficiente de seguridad, F , frente a un modo de fallo geotécnico calculado tal como se indica en esta ROM es un buen índice de la seguridad de la obra. Ha sido dicho por geotécnicos de gran prestigio algo que podría considerarse contrario a lo anterior, que un coeficiente de seguridad, por sí mismo, no es representativo de la seguridad si no lleva asociada una cierta medida de la incertidumbre de los factores de proyecto que han intervenido en su determinación. Ambas afirmaciones son ciertas, pues el coeficiente de seguridad que se calcula de acuerdo con lo establecido en la ROM 0.5 lleva implícito un cierto control del posible desconocimiento del terreno y de las acciones. La ROM 0.5 intenta que la incertidumbre en los parámetros geotécnicos, en la geometría de cálculo (incluida la representación del propio terreno) y en las acciones quede acotada y sea adecuada a cada caso. Allá donde el terreno sea más difícil de conocer habrá que hacer reconocimientos más intensos, cuando las acciones variables (siempre más imprecisas) estén presentes, su valor de cálculo sea más alto, etc. Además, no todos los problemas geotécnicos abordados por la ROM 0.5 serán analizados con métodos igualmente precisos y por eso los coeficientes de seguridad exigibles correspondientes tienen, en cierta medida, una consideración, aunque sea parcial o indirecta, de este hecho. Los valores umbrales mínimos recomendados para los coeficientes de seguridad son más altos cuando el método de cálculo es más impreciso. Los coeficientes de seguridad calculados con los métodos de Nivel I descritos en esta ROM son, en suma, una información relevante relacionada con la seguridad de la obra.

A pesar de lo dicho, sigue siendo cierto que la incertidumbre que existe en el valor del coeficiente de seguridad no queda reflejada de forma expresa en los resultados de los cálculos que se realizan con los procedimientos de Nivel I y, por eso, es conveniente que, en obras importantes con índices IRE o ISA altos o muy altos, se deban aplicar además métodos de Niveles II y III, de acuerdo con lo dispuesto en la ROM 0.0, lo que permite precisar en mayor medida la fiabilidad de la obra y, por tanto, su probabilidad de fallo.

Sin perjuicio de lo anterior, en este apartado se introduce un método simplificado que permite al ingeniero valorar la incertidumbre del coeficiente de seguridad obtenido con los procedimientos de Nivel I en cada caso concreto y, consecuentemente, determinar de una forma más precisa la probabilidad de fallo asociada al mismo. Este procedimiento, que en el fondo responde a un análisis de sensibilidad, se basa en la obtención del coeficiente de variación de F y se detalla a continuación.

3.3.10.1 Fuentes de incertidumbre y su medida

No se pretende entrar en este texto de Recomendaciones geotécnicas a indagar en las causas de limitación del conocimiento. Esa parcela de la gnoseología debe quedar reservada a otros escritos. Haciéndolo únicamente de manera muy breve y sólo en lo que atañe a los problemas geotécnicos, las incertidumbres podrían proceder de los datos geométricos, de las acciones y de los parámetros geotécnicos. También existe cierta incertidumbre asociada al método de cálculo (o ecuación de verificación, como a veces se denomina a esta herramienta matemática).

La forma más sencilla de medir la incertidumbre de una cantidad x es su desviación típica σ . Cuando existe una posibilidad de medir x , si los valores que se obtienen en N determinaciones son x_1, x_2, \dots, x_n , se dice que la desviación típica de x es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_m - x_i)^2}{N-1}}$$

donde x_m es el valor medio de todas las determinaciones.

Matemáticamente, cada factor de proyecto que intervenga en el cálculo del coeficiente de seguridad F podría representarse por dos valores. En los cálculos clásicos (métodos de Nivel I) sólo se representan los datos por un valor. Ahora, para calcular la fiabilidad se requiere, para cada factor, otro dato que sería la desviación típica correspondiente.

Cuando se requiera calificar aún mejor la incertidumbre, será preciso aportar más información. No bastará con indicar un valor representativo y la confianza que se tiene en él, dando una medida de su desviación típica, sino también otros valores. Incluso podría ser necesario definir matemáticamente una función de densidad de probabilidad del dato en cuestión. Pero este no es el caso que se quiere considerar en este apartado. En lo que sigue y para cada dato relevante del problema se supone que, además de la definición convencional que ha venido haciéndose siempre y que debe seguir haciéndose, existe, como medida de su dispersión o incertidumbre, un valor estimado de su desviación típica.

A veces el ingeniero no sabe como abordar el problema que implica la estimación de la desviación típica. Si no se indicase nada relativo a la forma de hacerlo, sería muy probable que diferentes ingenieros concluyeran con valores de la desviación típica muy diferentes. Por eso conviene indicar unas ideas generales que sirvan para orientar en ese proceso.

El valor de la desviación típica de un parámetro geotécnico puede estimarse de tres formas complementarias: en base a la experiencia, a partir de resultados de ensayos y mediante la regla de las dos desviaciones típicas.

VALORES USUALES DE σ , SEGÚN LA EXPERIENCIA

Ingenieros geotécnicos de prestigio reconocido, conocedores no sólo de la geotecnia sino también de los temas relacionados con los cálculos de fiabilidad, han realizado ya muchas veces el ejercicio de estimar las desviaciones típicas de los parámetros geotécnicos más comunes en diferentes lugares y han tenido a bien publicarlo ⁽²⁾. En la Tabla 2.14.1 de esta ROM se indican unos valores medios aproximados que, a juicio de la comisión de redacción de esta ROM, son razonables después de conocer los datos publicados por varios autores. Pero se insta al ingeniero para que, en su caso, consulte fuentes bibliográficas adecuadas y actualizadas para obtener una impresión más completa del coeficiente de variación correspondiente. En la tabla mencionada, así como suele hacerse en las publicaciones técnicas sobre este tema, se indica el “coeficiente de variación”, v , que es el valor de la desviación típica dividido por el valor medio.

$$v = \frac{\sigma}{x_m}$$

OBTENCIÓN DE LA DESVIACIÓN TÍPICA A PARTIR DE ENSAYOS

No cabe duda de que, desde el punto de vista teórico, la mejor forma de obtener la desviación típica es disponer de un buen banco de datos estadísticos que permita determinarla directamente. Pero existen algunos argumentos prácticos que restan valor a este procedimiento.

(2) Véase por ejemplo J. M. Duncan (2000). “Factors of safety and reliability in geotechnical engineering”, ASCE. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 4.

Los ensayos que se analizan deben corresponder a un mismo tipo de terreno. No deben mezclarse datos de ensayos correspondientes a terrenos diferentes. En este sentido, esta ROM indica ciertos criterios para identificar dos zonas o dos estratos como terrenos diferentes. Esa separación no es fácil y desgraciadamente no es posible dar recomendaciones precisas sobre el procedimiento con el que deben hacerse estas distinciones.

Los ensayos indican la respuesta del terreno a una situación similar a la que importa, pero ésta difiere de ella en muchos aspectos, entre otros el tamaño de la zona ensayada. No es posible saber de manera fácil si las variaciones de resultados que se obtienen en los ensayos se deben a aspectos relacionados con el terreno (variabilidad espacial) o con el propio ensayo.

Sin entrar en más detalles, puede concluirse que no es recomendable utilizar como única fuente de información para obtener la desviación típica de un factor de proyecto los resultados de los estudios estadísticos de los bancos de datos. Conviene además introducir, como siempre, cierto criterio adicional para determinar un valor adecuado de σ .

LA REGLA DE LAS DOS DESVIACIONES

Normalmente los ingenieros representan de forma gráfica la información geotécnica. Suelen realizar diagramas de resistencia, esquemas de variación con la profundidad de los datos más relevantes, etc. El objetivo de esos gráficos es tener una apreciación visual de los resultados para juzgar respecto a su homogeneidad o su posible dispersión.

Es frecuente, incluso, dibujar bandas de confianza o líneas límite que engloban los posibles resultados. Este proceso, aunque no está normalizado, es practicado de forma casi universal y esta ROM recomienda que se siga haciendo y que se complete el proceso para elegir no sólo el valor de cálculo, como antes se hacía, sino también para obtener una medida de la desviación típica.

La regla de las dos desviaciones, considerada y discutida por los investigadores del tema, indica que los datos de una población suelen fijarse entre unos límites que los geotécnicos, sin intentarlo, suelen situar a dos desviaciones típicas del valor medio. Si esto fuese cierto, se tendría:

$$\sigma = \frac{x_{\text{máx}} - x_{\text{mín}}}{4}$$

siendo $x_{\text{máx}}$ y $x_{\text{mín}}$ los valores máximo y mínimo que el ingeniero espera como rango de variación del dato x .

Existe una débil pero significativa justificación de la afirmación precedente. Estadísticamente se puede demostrar que, en ciertas condiciones (distribución normal de la variable en cuestión), el rango de variación esperable en los resultados obtenidos con unas treinta determinaciones de una variable aleatoria tiene una amplitud igual a las dos desviaciones típicas que se han indicado. Cuando el número de determinaciones es menor, unas diez, ese rango es algo más estrecho, del orden de vez y media la desviación típica o cada lado de la media. De esta manera, puede decirse que lo que los ingenieros geotécnicos suelen hacer para fijar los valores extremos de sus datos parece que coincide aproximadamente con lo indicado en la regla precedente.

Es siempre recomendable que el ingeniero tante los tres procedimientos indicados para obtener el valor de σ que debe utilizar para cada factor que juegue un papel relevante en la determinación del coeficiente de seguridad. Después de esos tanteos deberá decidir con su criterio cuál es el que a su juicio mide mejor la incertidumbre del factor en cuestión.

Por otro lado, el ingeniero geotécnico debe conocer también cuál es la incertidumbre de las acciones. No existe problema conceptual con las acciones del propio peso del terreno, pues los pesos específicos suelen ser parámetros sobre los que los ingenieros geotécnicos pueden establecer criterios adecuados. El problema se presenta cuando se trata de establecer una desviación típica asociada al valor nominal o característico de una acción

variable, ya sea procedente de la explotación de la obra o de un agente climático. En esos casos el ingeniero geotécnico requerirá cierta ayuda específica, pues el problema es complicado y la aproximación del valor de σ que él pueda obtener puede estar muy desviada de la realidad. Más adelante se indican, no obstante, algunos valores de σ que podrían utilizarse si no se hubiese podido encontrar mejor información.

3.3.10.2 El cálculo de referencia

La estimación de la probabilidad de fallo según el procedimiento sencillo que se comenta aquí exige, como paso previo, el cálculo de los coeficientes de seguridad correspondientes con el método de Nivel I según se recomienda en esta ROM. Esos resultados serán la base del cálculo posterior. El cálculo de Nivel I se realizará siempre y será la referencia básica para cualquier estudio de sensibilidad posterior.

3.3.10.3 Estudios de sensibilidad individuales

Los ingenieros geotécnicos están acostumbrados a realizar estudios de sensibilidad (a veces se denominan estudios paramétricos) que consisten en repetir los cálculos para obtener nuevos valores del coeficiente de seguridad, cambiando de uno en uno los datos del problema y manteniendo el resto de los datos fijos.

El procedimiento de estimación de la fiabilidad que se recomienda hacer en obras de gran importancia y que se viene describiendo en este apartado, no es otra cosa que un estudio de sensibilidad ordenado.

Para medir la sensibilidad a un determinado factor de proyecto, conviene cambiar su valor de cálculo, manteniendo los valores del resto de los factores fijos, y obtener otra vez el valor correspondiente de F . Es conveniente que la amplitud del cambio coincida con la desviación típica y se haga en el sentido desfavorable.

El valor del coeficiente de seguridad que se obtendrá de ese nuevo cálculo será F^* . Con estos dos datos, el valor que ya existía de F y el nuevo valor, se define como índice de sensibilidad, v , al valor:

$$v = \frac{F - F^*}{F}$$

donde F^* es una estimación centrada de F .

Comentario: Realmente el índice de sensibilidad de F al valor de cálculo x de un determinado factor de proyecto sería el definido por la siguiente expresión matemática:

$$v = \frac{\sigma}{F_m} \cdot \frac{\partial F}{\partial x}$$

donde: σ = desviación típica de x ; F_m = valor medio de F

La expresión antes propuesta para evaluar v es una simplificación que puede usarse por comodidad de cálculo.

Alternativamente, si se requiriese mayor precisión, la sensibilidad podría determinarse con incrementos y disminuciones más pequeños del valor del factor de proyecto ($\pm \alpha \sigma$ con $\alpha < 1$) y después amplificar el efecto adecuadamente (dividiendo la diferencia de valores de F por el factor α).

También sería posible e incluso recomendable, pues no se requiere gran esfuerzo adicional en estos cálculos, realizar, en lugar de uno, dos cálculos de sensibilidad, cambiando el factor de proyecto en ambos sentidos, el favorable y el desfavorable, para obtener F^+ y F^- y calcular:

$$v = \frac{F^+ - F^-}{2F_m}$$

Debe ser el ingeniero quien, en cada caso, resuelva sobre la precisión adecuada, consonante con la precisión de los datos y la importancia que debe dar a estos cálculos de sensibilidad.

3.3.10.4 Composición de las sensibilidades individuales

Realizados los cálculos precedentes, el ingeniero debe combinar conjuntamente los resultados obtenidos.

Las sensibilidades individuales que habrán de combinarse se indican más adelante, pues dependen del tipo de combinación de acciones correspondientes. En cualquier caso, una vez definidos los resultados parciales que han de combinarse, la forma más simple de hacerlo, para obtener el valor conjunto representativo de todas ellas y cuyo uso se recomienda, es la dada por la expresión:

$$v_F = (\sum v_i^2)^{1/2}$$

Comentario: La expresión precedente no presupone ninguna estructura probabilística en los datos correspondientes y puede usarse en general. Cuando se supone que los términos en los que intervienen los factores de proyecto para definir F tienen una distribución lognormal, como sugieren algunos autores, puede ser más conveniente componer las sensibilidades mediante la regla siguiente:

$$\ln(1 + v_F^2) = \sum \ln(1 + v_i^2)$$

3.3.10.5 Valor centrado del coeficiente de seguridad

El valor del coeficiente de seguridad que se calculaba en la práctica de la geotecnia convencional, cuando no se mayoraban las acciones y cuando no se minoraban las resistencias, es el que se suele denominar como valor más probable, F^* , en los textos que tratan el tema de la geotecnia probabilística. Pero no debe pensarse que esta asignación es rigurosa, pues no existe aún rigor en estos temas.

Puede que, cuando el tema geotécnico probabilista alcance mayor desarrollo y más consenso, se llegue a depurar este aspecto y se pueda definir con más precisión cuál es el valor central de referencia que debe usarse.

A falta de mejor criterio, los estudios de sensibilidad usarán un valor centrado, F^* , previamente estimado a partir del cálculo con el método de Nivel I.

El valor centrado, F^* , del coeficiente de seguridad depende de la combinación de acciones y se define más adelante en cada uno de los apartados que siguen.

3.3.10.6 Cálculo para la combinación cuasi-permanente

El cálculo de Nivel I de una situación cuasi-permanente para un determinado modo de fallo conduce al coeficiente de seguridad F , que se debe obtener de la manera indicada en esta ROM 0.5. Ese valor se considera además como valor centrado $F = F^*$.

En obras importantes, cuando sea recomendable realizar los estudios de sensibilidad ordenados que se indican en esta apartado, se deben cambiar, uno a uno, los factores de proyecto más relevantes. Normalmente serán los parámetros geotécnicos que definan la resistencia y algunos otros relacionados con posibles subpresiones o con algunas acciones.

Una vez calculadas las distintas sensibilidades, v_i , y compuestas todas según se indica en el apartado 3.3.10.4, se obtendrá el coeficiente de variación de F y, con él, el índice de fiabilidad y la probabilidad de fallo correspondiente, según se indica en 3.3.10.9.

3.3.10.7 Cálculo para cada una de las combinaciones fundamentales

El cálculo de Nivel I, que se habrá realizado previamente, antes de comenzar los estudios de sensibilidad, servirá como referencia básica para el estudio de la probabilidad de fallo correspondiente a cada una de las combinaciones de este tipo.

Por cada acción variable que se haya considerado como principal o dominante existirá un valor calculado para F. Para realizar los estudios de sensibilidad, se debe repetir el proceso aumentando en una desviación típica el valor de la acción variable principal que define la combinación en estudio. Cuando no se conozca la desviación típica del valor de la acción se podrá proceder como se indica a continuación.

Para modos de fallo geotécnico, denominados tipo GEO, normalmente el coeficiente de mayoración utilizado para realizar el cálculo de Nivel I será 1,3. Ahora, para repetir el cálculo se aumentará el coeficiente de mayoración al valor 1,5 y se obtendrá un coeficiente de seguridad menor. La diferencia con el valor anterior será ΔF_a .

Comentario: En las obras de ingeniería civil comunes, entre ellas las que caen dentro del ámbito de aplicación de la EHE, se suele utilizar el coeficiente de mayoración de acciones variables $\gamma_q = 1,5$. Ese coeficiente de mayoración depende de la fiabilidad que se pretende alcanzar, que normalmente es $\beta = 3,8$, durante la vida útil. La fiabilidad parcial que se suele introducir, en las acciones, β_A , es del orden del 70% de la total que se pretende, esto es $\beta_A = 2,7$. Para introducir esa seguridad, el valor de la acción debe multiplicarse por el coeficiente parcial:

$$\gamma_q = 1 + \beta_A \cdot v$$

siendo v el coeficiente de variación del valor de la acción. Al igualar este valor de γ_q con el antes indicado ($\gamma_q = 1,5$) se obtiene una estimación aproximada del coeficiente de variación de la acción, implícito en este proceso. Ese coeficiente es del orden de $v = 0,5 / 2,7 \cong 0,2$.

Como lo que se pretende, según el método simplificado que se viene describiendo, es aumentar el valor de la acción en una desviación típica, ese aumento quedaría conseguido cuando el coeficiente de mayoración se aumenta en dos décimas; del valor 1,3 que sirvió como referencia básica para el cálculo de F se pasaría al valor 1,5 que se sugiere para calcular el coeficiente de sensibilidad buscado.

El valor F, calculado con el procedimiento de Nivel I descrito en esta ROM, no es el valor centrado o más probable cuando se trata de combinaciones fundamentales, pues en su cálculo se han considerado ya acciones mayoradas. Para tener esto en cuenta se debe aumentar su valor hasta el valor F^* , que sería un valor centrado más conveniente, siendo:

$$F^* = F + 1,5 |\Delta F_a|$$

donde $|\Delta F_a|$ es el valor absoluto del cambio de F al aumentar la acción fundamental en una desviación típica, antes calculado.

Comentario: El coeficiente 1,5 que se utiliza en esta expresión sería la fiabilidad parcial que se introduce en las acciones, al mayorarlas como se dice en esta ROM, y corresponde a la incertidumbre normal antes indicada en el comentario precedente. En otros casos ha de utilizarse un coeficiente adecuado.

Con este primer paso se obtendría el coeficiente de sensibilidad de F al valor de cálculo de la acción, que sería el primero de los coeficientes de sensibilidad de los que hay que calcular. A ese coeficiente fundamental se le denomina:

$$v_a = \frac{|\Delta F_a|}{F^*}$$

Después se calcularía la sensibilidad de F respecto a la variabilidad de los parámetros geotécnicos de interés que normalmente serán los correspondientes a la definición de la resistencia y al peso. En estos cálculos de sensibilidad se variarían, de uno en uno, cada parámetro de interés. En cada uno de ellos se seguirán manteniendo las acciones variables mayoradas con el coeficiente de mayoración nominal (1,3 en los casos normales considerados en esta ROM). Por cada factor, i , que se cambie se obtendrá un cambio del coeficiente de seguridad, ΔF_i . Al dividir el valor de ese cambio de coeficiente por el valor F^* del coeficiente de seguridad, ya conocido antes de hacer el cambio, se obtendrá el valor de la sensibilidad correspondiente, $v_i = \Delta F_i / F^*$.

La sensibilidad a la acción y a los otros parámetros debe combinarse de manera cuadrática (raíz cuadrada de la suma de los cuadrados) para obtener la sensibilidad buscada, v_F , que es el coeficiente de variación de F cuando actúa la acción predominante considerada.

En Fig 3.3.2 se indica un diagrama esquemático de este proceso.

Todo el proceso debe repetirse para cada combinación fundamental de acciones, cada una dominada por un agente principal. Normalmente habrá pocos agentes dominantes que puedan resultar críticos y deban considerarse en los cálculos. Una selección previa de aquéllos que puedan serlo, ahorrará tiempo de análisis.

3.3.10.8 Cálculo en combinaciones accidentales o sísmicas

Las combinaciones excepcionales, sean accidentales, sísmicas o de otro tipo, habrán sido analizadas y su seguridad evaluada a través del coeficiente de seguridad F correspondiente.

Para estimar la probabilidad de fallo de la obra por causa de una de estas combinaciones de acciones se debe proceder a un cálculo de sensibilidad respecto al valor de la propia acción que caracteriza la situación. Para ello se hará crecer la acción correspondiente en un valor igual a la desviación típica. El ingeniero debe investigar este valor. Cuando no exista información específica, se puede suponer que el valor de la desviación típica es igual al 13% del valor nominal de la acción extraordinaria.

Comentario: El valor nominal, A_N , de una acción excepcional suele estar asociado a una probabilidad de ocurrencia baja durante la vida útil de la obra. En su definición existe ya cierta fiabilidad implícita de manera que podría escribirse:

$$A_N = A (1 + \beta_A \cdot v_A)$$

siendo β_A la fiabilidad parcial mencionada, v_A el coeficiente de variación correspondiente y A un cierto valor centrado de la acción.

Esa fiabilidad parcial equivale, aproximadamente, a la que se introduce al mayorar las acciones variables en los códigos estructurales ($\gamma_q = 1,5$). De esa manera se obtendría:

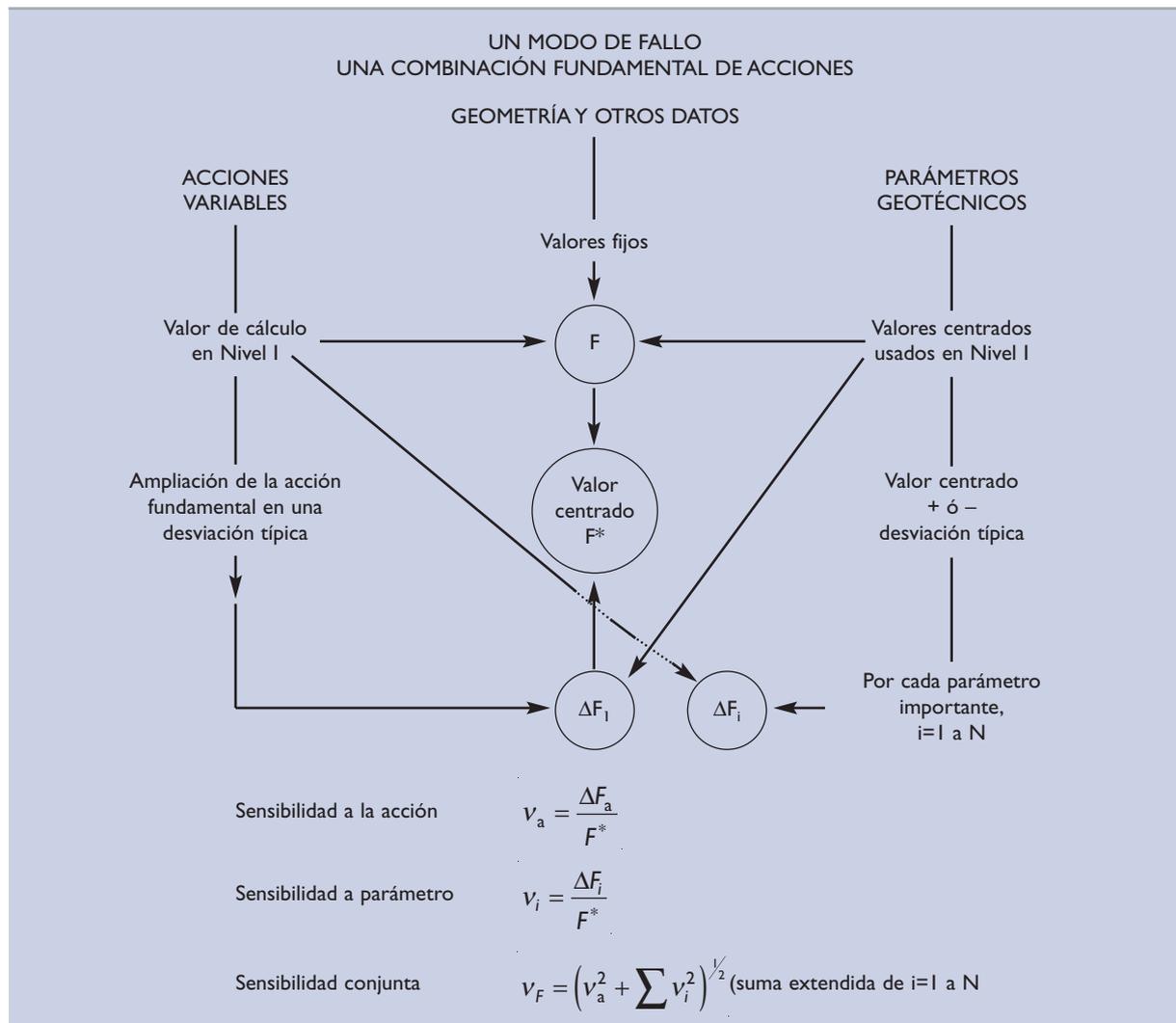
$$1 + \beta_A \cdot v_A = 1,5$$

La incertidumbre en el valor de la acción excepcional se supone aquí, a falta de otros criterios, $v_A = 0,20$ como en un caso típico de incertidumbre en las acciones variables. Con estos supuestos, la desviación típica de la acción excepcional resultaría ser:

$$\sigma_A = v_A \cdot A = \frac{v_A}{1 + \beta_A \cdot v_A} \cdot A_N = \frac{0,2}{1,5} \cdot A_N = 0,13 A_N$$

que es el valor recomendado en este cálculo de sensibilidad.

Figura 3.3.2. Posible ordenación de los estudios paramétricos (Cálculos de sensibilidad)



Aumentando en una desviación típica el valor de la acción extrema se calculará el valor absoluto del cambio de coeficiente ΔF_a y, con él, el coeficiente de sensibilidad correspondiente a la acción:

$$v_a = \frac{\Delta F_a}{F^*}$$

El valor centrado, F^* , del coeficiente de seguridad para este tipo de combinación será el siguiente:

$$F^* = F + 2,7 |\Delta F_a|$$

donde $|\Delta F_a|$ es el valor absoluto del cambio del coeficiente de seguridad que se obtiene al cambiar el valor de la acción y F el valor del coeficiente de seguridad que se obtuvo antes de cambiarla.

El coeficiente 2,7 de la expresión anterior se basa en ciertos supuestos. Ver comentarios precedentes donde $\beta_A = 2,7$. En otros supuestos, el ingeniero debe adecuar este coeficiente.

Después, modificando en una desviación estándar, hacia el lado desfavorable (y también hacia el lado favorable si se busca más precisión), cada uno de los parámetros del terreno (principalmente las resistencias) y otros

posibles factores de interés, se obtendrán valores de las respectivas modificaciones del coeficiente de seguridad, ΔF_i , que permitirán calcular los correspondientes coeficientes de sensibilidad individuales v_i .

La composición de sensibilidades se realizará como ya se ha indicado (apartado 3.3.10.7).

3.3.10.9 Índice de confianza y probabilidad de fallo

Una vez calculado el valor aproximado de v_F y conocido el valor centrado, F^* , del coeficiente de seguridad, se obtendrá el índice de confianza β y la probabilidad de fallo correspondiente para la combinación en consideración.

Se denomina con el nombre de índice de fiabilidad, β , frente a un modo de fallo y para un determinado tipo de combinación de acciones, al número de desviaciones estándar que es preciso mover el valor centrado, F^* , para que ocurra el fallo teórico ($F = 1$).

Para calcular el índice de fiabilidad es preciso suponer una cierta estructura para la distribución probabilística de F^* . Aquí se recomienda hacer la hipótesis de distribución lognormal. Con esto resulta que el índice de fiabilidad, β , está dado por la expresión siguiente:

$$\beta = \frac{\ln F^*}{\zeta} - \frac{1}{2} \zeta$$

siendo ζ la desviación típica de $\ln F$, que viene dada por la expresión:

$$\zeta = \sqrt{\ln(1 + v_F^2)}$$

y donde v_F es el valor definido en los apartados precedentes.

Después de realizar el estudio de sensibilidad indicado para cada combinación de acciones se debe elegir como índice de confianza correspondiente al modo de fallo en cuestión el menor de los encontrados, ya sea en la combinación cuasi-permanente o en algunas de las combinaciones fundamentales o accidentales o sísmicas.

La relación que existe entre la probabilidad de fallo, p , y el índice de fiabilidad, β , es biunívoca, puede expresarse matemáticamente por la expresión siguiente:

$$p = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

siendo Φ la función de probabilidad acumulada estándar normalizada.

La función Φ puede encontrarse en muchos textos y rutinas de cálculo (el programa EXCEL la incluye). A continuación se indican algunos valores típicos de esa función.

Tabla 3.3.4. Algunos valores de β y p

β	p	β	p	β	p	β	p
0,0	0,5	2,0	$2,3 \times 10^{-2}$	3,0	$1,3 \times 10^{-3}$	0	0,5
0,5	0,31	2,1	$1,8 \times 10^{-2}$	3,1	$0,97 \times 10^{-3}$	1,30	0,10
1,0	0,16	2,1	$1,4 \times 10^{-2}$	3,2	$0,67 \times 10^{-3}$	1,64	0,05
1,2	0,13	2,3	$1,1 \times 10^{-2}$	3,3	$0,48 \times 10^{-3}$	2,32	10^{-2}
1,4	0,081	2,4	$0,82 \times 10^{-2}$	3,4	$0,33 \times 10^{-3}$	3,09	10^{-3}
1,5	0,067	2,5	$0,62 \times 10^{-2}$	3,5	$0,23 \times 10^{-3}$	3,72	10^{-4}
1,6	0,055	2,6	$0,47 \times 10^{-2}$	3,6	$0,16 \times 10^{-3}$	4,27	10^{-5}
1,7	0,045	2,7	$0,35 \times 10^{-2}$	3,7	$0,11 \times 10^{-3}$	4,75	10^{-6}
1,8	0,036	2,8	$0,26 \times 10^{-2}$	3,8	$0,072 \times 10^{-3}$	5,20	10^{-7}
1,9	0,029	2,9	$0,19 \times 10^{-2}$	3,9	$0,048 \times 10^{-3}$	5,61	10^{-8}

3.3.10.10 Verificación de la seguridad

Después de completar los cálculos de la manera que se ha descrito se obtendrán, además de los coeficientes de seguridad F_1 , F_2 y F_3 , los datos añadidos de las probabilidades de fallo correspondientes. A todos y cada uno de los coeficientes de seguridad calculados mediante el método de Nivel I se le habrá asociado ahora, al concluir estos cálculos simplificados de fiabilidad, un valor de la probabilidad de fallo.

En los casos más generales y para obras de ISA bajos (entre 5 y 19) en las que los aumentos de fiabilidad asociadas a modos de fallo geotécnico no sean muy difíciles de conseguir o no estén alejados de los que resulten adecuados desde el punto de vista económico, se puede dar por verificada la seguridad frente a dichos modos de fallo cuando los coeficientes F_1 , F_2 y F_3 , obtenidos de acuerdo con los criterios fijados en esta ROM, sean mayores que los umbrales mínimos recomendados en la misma. Si las circunstancias son normales se cumplirá, además, que las probabilidades de fallo asociadas a dichos coeficientes de seguridad quedarán por debajo del valor de 10^{-3} , pudiendo considerarse dichos fallos como fallos no principales y, por tanto, pudiendo desprejarse su contribución para el cálculo de la probabilidad global de fallo de la obra, simplificándose enormemente los diagramas de fallo.

En caso de que alguna de las probabilidades de fallo fuese superior al máximo recomendable, el ingeniero analizará la situación y, bien aumentará la seguridad de la obra, o bien valorará los efectos que tiene en el cálculo de la probabilidad global de fallo de la obra.

No se ve recomendable lo contrario: disminuir la seguridad de una obra sin cumplir los requisitos mínimos en F_1 , F_2 y F_3 basándose en un cálculo simplificado de la probabilidad de fallo como el que aquí se ha descrito. El cálculo probabilístico necesario para incumplir los umbrales de seguridad fijados en términos del cálculo con procedimientos de Nivel I debería ser más riguroso y más detallado que el cálculo simplificado que se describe en este apartado.

Lo señalado en este apartado también será válido para obras de ISA no significativo (<5) o altos (≥ 20), considerando en estos casos los coeficientes de seguridad mínimos asociados con probabilidades de fallos ELU de 10^{-2} y 10^{-4} respectivamente, obtenidos a partir de los coeficientes F_1 , F_2 y F_3 definidos en esta ROM de acuerdo con los criterios del apartado 3.3.8.2. Esos valores de las probabilidades de fallo se han considerado aquí con cierto valor sólo como una referencia para ordenar los cálculos. No debe pensarse que impliquen ninguna posibilidad real de rotura de la obra.

Se advierte, en todo caso, que la tecnología actual de los cálculos probabilísticos de los temas tratados en esta ROM no está aún plenamente desarrolladas para los casos de baja probabilidad de fallo que se vienen considerando, pues los resultados son excesivamente sensibles a las formas de las colas de las distribuciones estadísticas que se asignen a los factores de proyecto. Y esas formas no son hoy bien conocidas. El ingeniero deberá tener esto en cuenta cuando verifique los distintos aspectos de la seguridad.

3.4 FILTRACIONES Y CONSOLIDACIÓN

3.4.1 Problemas geotécnicos más comunes

Los problemas geotécnicos más comunes asociados con el movimiento del agua dentro del terreno (filtración) son:

- ◆ Estudio de caudales de filtración.
- ◆ Empuje del agua sobre estructuras.
- ◆ Estudio de rebajamiento del nivel freático.
- ◆ Estudio de la seguridad frente al levantamiento de fondo.
- ◆ Estudio de la posible erosión interna.

Dentro de estos temas se incluyen, también,

- ◆ Estudio de consolidación de masas de suelo.
- ◆ Generación y disipación de presiones intersticiales.

ya que, aunque sean problemas mixtos flujo-deformación, están controlados, fundamentalmente por la permeabilidad del terreno, aspecto éste primordial en los problemas que se consideran en este apartado.

Son de especial interés estos temas en el proyecto de diques secos, donde han de mantenerse achiques permanentes, y lo son también en el caso de los rellenos hidráulicos que se suelen realizar como trasdós de muelles de gravedad.

Los problemas de levantamiento de fondo y arrastre son típicos en las obras de achique que se suelen realizar, con carácter transitorio, para la construcción en seco, bajo el nivel freático.

Los principios básicos que deben guiar el estudio de este tipo de situaciones son los que se exponen en los apartados siguientes.

3.4.2 Dibujo de redes de filtración

3.4.2.1 Terrenos homogéneos e isótropos. Problemas bidimensionales

Los problemas de filtración en medios porosos e indeformables por el movimiento del agua (suelos o rellenos en condiciones drenadas), considerando régimen laminar, suelen resolverse admitiendo la ley de Darcy definida en el apartado 2.2.6 (permeabilidad). Un determinado problema queda resuelto teóricamente cuando se conoce el potencial ϕ , en cualquier punto del dominio de la filtración. Se entiende por tal el valor dado por la expresión:

$$\phi = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

donde:

- u = presión intersticial.
- γ_w = peso específico del agua.
- z = elevación sobre un plano de referencia.

En los casos en que el terreno es homogéneo e isótropo y tanto el fluido como el terreno son incompresibles, el planteamiento teórico del problema conduce a la ecuación de Laplace:

$$\Delta \phi = 0$$

Las líneas que unen puntos de igual potencial son denominadas líneas equipotenciales y, en los medios isótropos, cualquier línea que, en todo su trayecto, las corte ortogonalmente será una línea de corriente. El conjunto de ambas familias, que se suele dibujar de manera que determinen entre ellas elementos de dimensión similar en ambas direcciones, se conoce como red o malla de filtración.

Existe un buen número de soluciones analíticas o semianalíticas de problemas de filtración en medios homogéneos e isótropos, que pueden ayudar a la solución de casos reales de geometría sencilla, en los que no sería necesario dibujar redes de filtración.

El dibujo exacto de redes de filtración puede ser difícil y en problemas complejos es necesaria la ayuda de ordenador para dibujar una red precisa. Sin embargo, son muchos los problemas de filtración que pueden y deben resol-

verse con aproximaciones sencillas. Únicamente cuando el problema que se investiga sea realmente importante estarán justificados, además, otros procedimientos más detallados que los métodos simples aquí recomendados.

3.4.2.2 Terrenos anisótropos

En situaciones que impliquen una clara anisotropía de la permeabilidad el problema se puede resolver aplicando la transformación de Samisøe que puede verse en los libros dedicados al tema. Consiste, fundamentalmente, en dibujar la red en otra geometría en la que las dimensiones horizontales (suponiendo que en esa dirección ocurra la mayor permeabilidad, como suele suceder) se reducen en una proporción igual a la raíz cuadrada del cociente de permeabilidades $(k_h/k_v)^{1/2}$. Una vez dibujada la red de filtración cuadrada en esa figura más esbelta, donde las alturas están más acusadas (o las anchuras más reducidas), se debe deshacer el cambio de escala para obtener las líneas de flujo reales y las líneas equipotenciales, que formarán un sistema de cuadriláteros curvilíneos no ortogonales y de distinta medida a lo largo de equipotenciales que a lo largo de líneas de corriente.

3.4.2.3 Terrenos heterogéneos

El caso más frecuente es el de filtraciones en terrenos heterogéneos formados por estratos o zonas de distinta permeabilidad. En esos casos es posible realizar un dibujo aproximado de la red de filtración. Es particularmente fácil cuando la frontera que separa dos medios de distinta permeabilidad coincide con una línea de corriente o con una línea equipotencial, ya que entonces se producen dos flujos paralelos independientes (primer caso) o un flujo en serie cuya solución es inmediata, tal como se indica en la Fig. 3.4.1.

Los casos reales, particularmente aquéllos en los que existen materiales de permeabilidad muy diferente, pueden aproximarse mediante composición de flujos a través de cada uno de los materiales de distinta permeabilidad, bien sea mediante flujos independientes en paralelo, bien mediante flujos en serie.

Siempre es posible y recomendable intentar una solución simple por este procedimiento procurando que las simplificaciones realizadas conduzcan a una solución conservadora. La Fig. 3.4.2 indica esquemáticamente una solución simplificada para el caso típico del estudio de la filtración a través de la banquetta permeable de un muelle de gravedad.

3.4.2.4 Problemas tridimensionales

Cuando el carácter tridimensional sea muy marcado y la solución bidimensional aplicada a distintas secciones planas de la obra sea, a juicio del ingeniero, poco adecuada, habrá de recurrirse al estudio tridimensional de la red de filtración que, en general, requerirá la utilización de un ordenador y de un programa de flujo adecuado.

Dado que el esfuerzo necesario para dibujar redes de filtración plana es relativamente pequeño, cuando se compara con los cálculos tridimensionales, la realización de éstos no debe excluir que, al menos con carácter orientativo, se estudien algunas secciones planas que pueden servir para acotar la solución del problema.

3.4.3 Caudales de filtración

3.4.3.1 Problemas bidimensionales, isotrópicos y homogéneos

En los problemas de filtración bidimensionales en suelos homogéneos e isotrópicos y cuando el agua se mueve entre dos equipotenciales extremas (nivel freático en el trasdós y nivel freático en el intradós de un muro, por ejemplo), el caudal de filtración por unidad de longitud en el sentido perpendicular al plano de estudio se puede expresar mediante:

$$Q = \Delta\phi \cdot k \cdot n$$

Figura 3.4.1. Filtración simple en medios heterogéneos

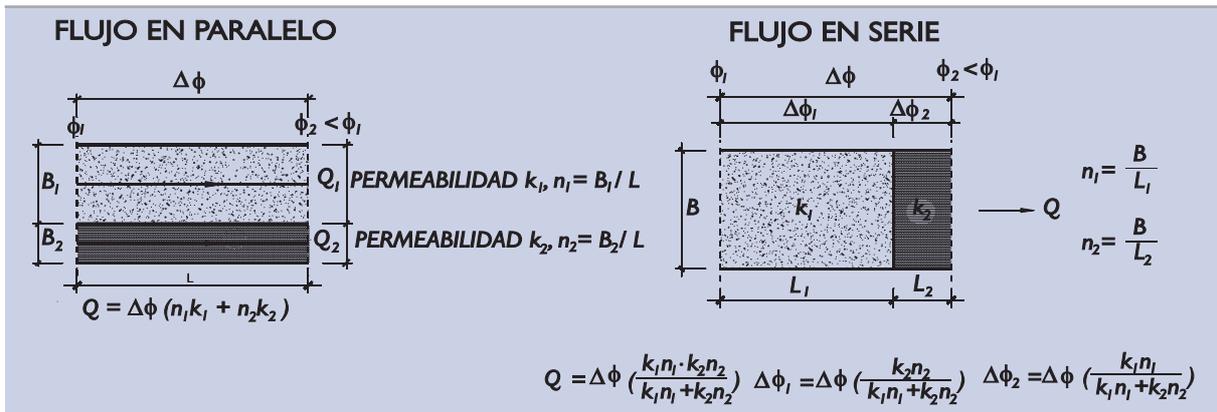
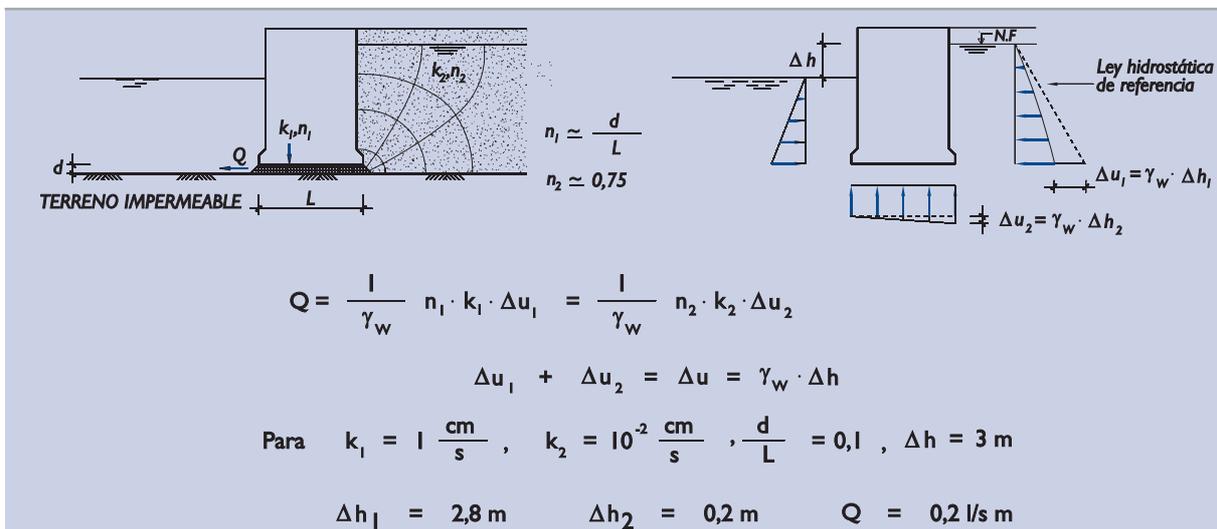


Figura 3.4.2. Solución simple. Filtración bajo un muelle



donde:

$\Delta\phi$ = diferencia de potencial entre la entrada y la salida.

k = permeabilidad.

n = número adimensional que depende de la geometría del medio.

Habida cuenta de que la precisión con la que se conoce la permeabilidad suele ser escasa, es raro que el cálculo de un caudal, u otras variables asociadas a la filtración, requiera grandes esfuerzos para determinar “n”.

El número adimensional “n” es el cociente entre el número total de “tubos de flujo”, N_f , y el número total de saltos de potencial N_p , en redes de filtración cuadradas, esto es:

$$n = \frac{N_f}{N_p}$$

Como ejemplo de cálculo del número adimensional “n” pueden verse los casos incluidos en las figuras de este apartado nº 3.

3.4.3.2 Terrenos anisótropos

En los problemas anisótropos el caudal de filtración viene dado por la expresión:

$$Q = \Delta\phi (k_h \cdot k_v)^{1/2} \cdot n$$

Donde “n” es, como en los casos isótropos, el cociente entre el número de canales de flujo y el número de saltos de potencial, en redes de filtración dibujadas como se indica en 3.4.2.2, y donde:

$\Delta\phi$ = diferencia de potencial entre la entrada y la salida.
 k_h y k_v = permeabilidad en las dos direcciones principales de la anisotropía.

3.4.3.3 Terrenos heterogéneos

En caso de terrenos heterogéneos pero que tengan zonas homogéneas amplias se puede estimar el caudal que atraviesa cada una de esas zonas aplicando las expresiones antes indicadas (3.4.3.1 ó 3.4.3.2, según se trata de un medio isótropo o no). En esos casos la diferencia de potencial entre la entrada y la salida se entenderá que se refiere al principio y al final de la zona homogénea considerada, así como los “tubos de flujo” y los saltos de potencial serán los que queden dentro de esa zona homogénea.

Un ejemplo de cálculos de caudales en algunas situaciones heterogéneas pueden verse en las Figs. 3.4.1 y 3.4.2.

3.4.3.4 Problemas tridimensionales

En problemas tridimensionales el cálculo es más complejo, aunque la tipología de la expresión que relaciona al caudal total con la permeabilidad y el salto de potencial sigue siendo la misma.

En estos casos el número “n” tiene dimensiones de longitud y, en general, su determinación requerirá el uso de ordenador o de soluciones analíticas publicadas.

En el Apéndice de la Parte 2 de esta ROM se incluyen las soluciones de algunos casos tridimensionales utilizados en la interpretación de ensayos de permeabilidad “in situ” que también pueden ser útiles en el estudio de otros problemas de filtración tridimensionales.

3.4.4 Empujes del agua intersticial sobre estructuras

Las estructuras que estén afectadas por la filtración del agua están sometidas, en sus paredes, a empujes de valor diferente al hidrostático (agua en reposo).

La determinación de estos empujes requerirá, en general, un dibujo previo de la red de filtración. Normalmente los materiales estructurales son mucho menos permeables que el terreno y, por eso, en general, las redes de filtración correspondientes pueden dibujarse suponiendo que el contacto de la estructura y el terreno es un borde impermeable del problema y que, por lo tanto, coincide con una línea de filtración.

En aquellas ocasiones en que la estructura tenga una permeabilidad similar a la del terreno, la red de filtración habría de dibujarse considerando el problema de carácter heterogéneo e introduciendo la estructura como un material más.

Una vez dibujada la red de filtración, las presiones de agua en el contacto terreno-estructura (o empujes del agua) son fáciles de estimar, ya que:

$$u = (\phi - z) \gamma_w$$

siendo “z” la elevación del punto sobre el plano de referencia utilizado para definir al potencial ϕ .

Un ejemplo de estimación de las leyes de empuje del agua sobre un cajón de un muelle de gravedad es el ilustrado en la Fig. 3.4.2. El de la Fig. 3.4.3 corresponde al empuje sobre las tablestacas de la entibación de una excavación con achique.

La presión del agua que se indica en esas figuras actuaría directamente sobre el paramento de contacto tierras-estructura de contención. En ocasiones es necesario calcular las presiones de agua en otros puntos. Ése es el caso cuando se trata de calcular el empuje del agua en el contexto de los métodos descritos en los apartados 3.7.5 y 3.7.7 para calcular empujes activos y pasivos, respectivamente, sobre estructuras de contención. En esos casos es preciso conocer el estado de presiones intersticiales a lo largo de planos de referencia próximos a los de deslizamiento de las cuñas activas o pasivas.

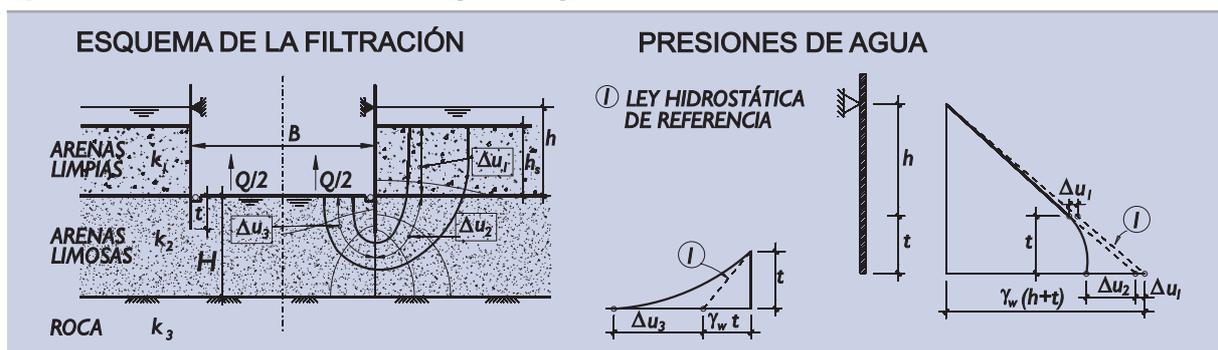
Esas presiones de agua, que en general serán algo mayores que las del paramento del muro, se pueden calcular fácilmente una vez se conoce la red de filtración.

3.4.4.1 Niveles de las aguas exteriores y de las líneas de saturación en terrenos naturales y rellenos

Los niveles de agua a considerar para la obtención de los empujes de agua sobre las estructuras, que se pueden asimilar a efectos de respuesta de la obra y del terreno con un carácter estacionario, vendrán determinados por las oscilaciones de largo periodo de las aguas libres, la existencia de aportaciones subterráneas a través del terreno, la tipología estructural de la obra, la permeabilidad de cimientos, terrenos naturales, rellenos y obras y, en su caso, por el tipo y capacidad de los sistemas de drenaje y de otras formas de variación artificial de niveles previstos en el proyecto, así como de las tolerancias admitidas para estos casos en los Pliegos de Prescripciones Técnicas Particulares.

El ingeniero deberá fijar los niveles de agua representativos, en cada situación o estado de proyecto y para cada tipo de combinación de acciones considerado, siempre que sea posible, sobre base estadística o experimentalmente sobre todo cuando existan importantes flujos de corrientes subterráneas terrestres, presión artésiana o exposición continuada a la acción del oleaje.

Figura 3.4.3. Solución de una excavación y un achique con entibación



NIVEL DE LAS AGUAS LIBRES EXTERIORES

Los niveles altos y bajos de las aguas exteriores en las áreas litorales, que se pueden considerar a efectos de la respuesta de la obra que tienen un carácter estacionario, son debidos fundamentalmente a la combinación de mareas astronómicas, mareas meteorológicas, seiches (ondas largas), resacas costeras (wave-setup) y régimen hidráulico de las corrientes fluviales en rías, estuarios, desembocaduras y puertos fluviales.

En aquellos casos en los que no se considere el nivel de agua conjuntamente con otras acciones climáticas (oleaje, corrientes, viento,...) formando un grupo de acciones variables dependientes, ni se considere el nivel de las aguas como acción accidental, se tomarán como niveles de las aguas exteriores los valores representativos de la Tabla 3.3.1 en función del tipo de combinación de acciones considerado. La concreción de esos niveles representativos en las distintas áreas portuarias españolas se incluye en la ROM 0.3.

Adicionalmente, en recintos confinados naturales (bahías o estuarios) o artificiales (dársenas) el ingeniero tendrá especial cuidado en comprobar la posibilidad y frecuencia de fenómenos de resonancia debido a la penetración de ondas largas. En estos casos pueden presentarse alteraciones de niveles de hasta 3 metros que deberán compatibilizarse con los niveles representativos definidos con carácter general para las aguas exteriores.

NIVEL DE LA LÍNEA DE SATURACIÓN EN RELLENOS Y TERRENOS NATURALES

Con carácter general, en mares con marea astronómica significativa, el nivel de la línea de saturación en rellenos y terrenos naturales se puede suponer que se mantiene constante en el nivel medio del mar + 0,3 metros a partir de una distancia aproximada de 20 metros desde la línea de costa. Para mares sin marea astronómica significativa dicho nivel coincidirá con el nivel medio del mar. Para corrientes fluviales, afectadas o no por mareas, o zonas con marea sometidas a corrientes fluviales, la línea de saturación coincidirá con sus niveles medios en estiaje o avenida en función del periodo estacional. Dichos niveles pueden estar sometidos a modificaciones importantes al alza cuando se presenten:

- ◆ Corrientes subterráneas terrestres de aportación interna o provenientes de pluviometría directa, cuyo desagüe esté dificultado o impedido por estructuras costeras extensas.
- ◆ Presiones artesianas
- ◆ Suelos o rocas de baja permeabilidad en el trasdós de estructuras de contención o en el terreno de cimentación
- ◆ Rellenos realizados por métodos hidráulicos
- ◆ Acción continuada del oleaje sobre la estructura resistente, el relleno o el terreno natural
- ◆ La existencia de sistemas artificiales de aportación o drenaje

En ausencia de datos estadísticos o experimentales relevantes, los niveles de agua del relleno o terreno natural en el contacto terreno-estructura compatibles con los niveles representativos para las aguas exteriores, adoptados en función del tipo de combinación de acciones considerada (ver Tabla 3.3.1), se consignan simplificada-mente para los casos más usuales en la Tabla 3.4.1, en función de las oscilaciones de largo periodo de las aguas libres y de la permeabilidad de cimientos, rellenos y obra, no considerándose la actuación de flujos subterráneos, ni la acción del oleaje ni demás formas naturales o artificiales de modificación de niveles. Para los casos no previstos en la Tabla será obligada la determinación de niveles sobre base estadística o experimental.

En el caso particular de un relleno realizado por métodos hidráulicos, en previsión de posibles excedencias en la capacidad de drenaje durante el vertido, podrá tomarse en los casos desfavorables para Fase de Construcción un nivel de saturación permanente razonablemente superior al menor a partir del cual el agua puede fluir libremente.

Las aportaciones de agua provenientes exclusivamente de pluviometría directa sobre la superficie exterior del terreno se tendrán en cuenta en los casos desfavorables suponiendo que producen aumentos adicionales en los niveles freáticos de rellenos y terrenos naturales. A falta de otros datos, únicamente se considerarán relevantes para los cálculos aumentos de nivel debidos a pluviometría directa sobre rellenos de alta permeabilidad ubicados en el trasdós de estructuras no permeables cimentadas en terrenos de baja permeabilidad o con estratos intermedios de baja permeabilidad. Esta situación únicamente se tendrá en consideración para combinación de acciones fundamentales o poco frecuente, adoptando un aumento de nivel igual al necesario para alojar a la máxima intensidad de precipitación en 24 horas, correspondiente a un periodo de retorno de 5 años.

Tabla 3.4.1. Desniveles límite a adoptar entre los niveles representativos de las aguas libres exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos

			Tipo de combinación de acciones				
			Quasi-permanente y sísmica (S)	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter no predominante	Fundamental y Poco Frecuente, cuando el nivel de las aguas tenga un carácter predominante	Frecuente y accidental (A)	
Desniveles entre los niveles representativos de las aguas exteriores y las líneas de saturación en terrenos o rellenos	Mar con marea astronómica significativa	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – NM			
			Media	0,3 (PM – BM)	0,3 (PMVE – BMVE)	0,3 (PVM – BVM)	
			Alta	0,15 (PM – BM)	0,15 (PMVE – BMVE)	0,15 (PVM – BVM)	
	Mar sin marea astronómica significativa	Permeabilidad de la obra	Baja	0	NAE – NM	0	
			Media	0	0,30 m	0	
			Alta	0	0,15 m	0	
Desniveles entre los niveles representativos de las aguas exteriores y las líneas de saturación en terrenos naturales o rellenos	Zonas con marea astronómica significativa sometidas a corrientes fluviales	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – (NME ó NMI)			
			Media	0,3 (carrera de marea media con nivel medio de estiaje o carrera de marea media con nivel medio de avenida, respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 20 años + carrera de marea media de las mareas vivas en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 50 años + carrera de marea media de las mareas vivas equinocciales en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % + carrera de marea media en situación de estiaje o avenida respectivamente)
			Alta	0,15 (carrera de marea media con nivel medio de estiaje o carrera de marea media con nivel medio de avenida)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 20 años + carrera de marea media de las mareas vivas en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 50 años + carrera de marea media de las mareas vivas equinocciales en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % + carrera de marea media en situación de estiaje o avenida respectivamente)
	Corrientes fluviales no afectadas por mareas	Permeabilidad de la obra	Baja	NAE – (NME ó NMI)			
			Media	0	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 20 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 50 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,3 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % en situación de estiaje o avenida respectivamente)
			Alta	0	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 20 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas correspondiente a un periodo de retorno de 50 años en situación de estiaje o avenida respectivamente)	0,15 (crecida o decrecida en 24 horas asociada a una probabilidad de no excedencia del 50 % en situación de estiaje o avenida respectivamente)

LEYENDA: NAE: Nivel representativo de las aguas exteriores; NM: Nivel medio del mar; PM: Pleamar media; BM: Bajamar media; PMVE: Pleamar máxima viva equinoccial o máxima marea astronómica; BMVE: Bajamar mínima viva equinoccial o mínima marea astronómica; PVM: Pleamar viva media; BVM: Bajamar viva media; NME: Nivel medio en situación de estiaje en corrientes fluviales; NMI: Nivel medio en situación de avenida en corrientes fluviales.

NOTAS:

A los efectos de esta tabla la permeabilidad de la obra se debe calificar del modo siguiente:

Baja – Cuando la estructura es de baja permeabilidad y lo son también el relleno y/o la obra.

Alta – Cuando el relleno, la estructura y el cimiento son de alta permeabilidad.

Media – En los otros casos.

Además se utilizan las siguientes ideas relativas a la calificación de la permeabilidad:

Rellenos o terrenos naturales de alta permeabilidad: aquéllos con coeficiente de permeabilidad $k > 10^{-3}$ cm/s

Rellenos o terrenos naturales de baja permeabilidad: aquéllos con coeficiente de permeabilidad $k < 10^{-5}$ cm/s

Estructuras permeables: aquéllas cuya permeabilidad no presenta interrupciones físicas que corten el flujo de agua al alcanzarse ciertas cotas (p.e. en estructuras de contención con mechinales)

VARIACIONES ARTIFICIALES DE LOS NIVELES DE LAS AGUAS EXTERIORES Y DE LAS LÍNEAS DE SATURACIÓN EN RELLENOS O TERRENOS NATURALES

En el caso de dársenas esclusadas u otras zonas sometidas a variaciones artificiales del nivel de las aguas exteriores, los niveles nominales máximos y mínimos del agua quedarán fijados atendiendo a los criterios de explotación establecidos en el proyecto. Asimismo, el proyecto fijará los aumentos y descensos máximos previstos en 24 horas.

En el supuesto de que existan aportaciones artificiales al terreno natural o al relleno, así como en el caso de que se adopten sistemas artificiales de drenaje, se determinarán los niveles máximos y mínimos de oscilación del agua en el terreno atendiendo a las características específicas en cada caso.

Si la causa originaria de las oscilaciones exteriores es artificial y éstas son las únicas que alimentan a un relleno o terreno natural, a falta de otros datos, se podrá considerar que el nivel freático en el terreno a largo plazo coincide con el de las aguas exteriores, siguiendo las oscilaciones de las mismas con los siguientes retrasos límites función de la permeabilidad de la obra.

◆ Permeabilidad alta

Retraso igual a 0,15 veces la variación máxima previsible del nivel exterior en 24 horas.

◆ Permeabilidad media

Retraso igual a 0,30 veces la variación máxima previsible del nivel exterior en 24 horas.

◆ Permeabilidad baja

Se considerará que el nivel freático del relleno o terreno natural no sufre variaciones al alterarse transitoriamente el nivel de las aguas exteriores.

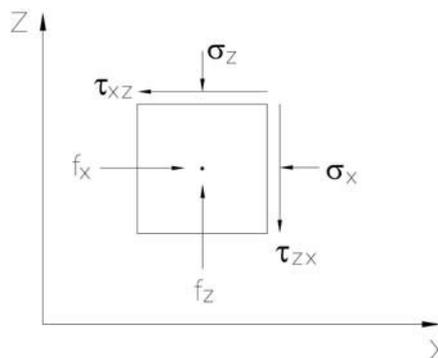
La posible reducción de niveles debida al establecimiento de sistemas de drenaje en rellenos o terrenos naturales sólo podrá ser tomada en consideración si el sistema de drenaje adoptado permite comprobar su funcionamiento y adoptar las medidas de limpieza y corrección del mismo en cualquier momento. En el supuesto de que el drenaje esté confiado a elementos de pequeña dimensión, como mechinales o válvulas de clapeta, se considerará que la cota de interrupción está situada 0,30 m por encima de la real, valor correspondiente a la carga mínima de agua necesaria para que funcionen. En estos casos se considerarán como mínimo desniveles de 1,00 m entre aguas exteriores y nivel freático del relleno o terreno natural.

3.4.5. Fuerzas de arrastre

El equilibrio tensional en el interior del terreno, expresado en términos de mecánica del continuo bidimensional y suponiendo aceleraciones nulas, conduce a las dos expresiones básicas siguientes:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = f_x$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = f_z$$



donde τ_{xz} es el esfuerzo de corte en caras horizontales y verticales y σ_x, σ_z las tensiones, positivas en compresión, según los ejes. Se supone que existen unas fuerzas f_x, f_z por unidad de volumen. Normalmente $f_x = 0; f_z = \gamma =$ peso específico del terreno.

Cuando el terreno está saturado y se quieren analizar por separado las presiones efectivas y las del agua, se puede aplicar el principio de Terzaghi ($\sigma' = \sigma - u$) que, sustituido en las ecuaciones precedentes, conduce a:

$$\frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = f_x - \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} = f_z - \frac{\partial u}{\partial z}$$

En problemas de filtración de agua en medios porosos suele utilizarse como variable básica el potencial ϕ (en muchos textos también se denomina h) definido mediante la expresión:

$$\phi = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

Con esta definición resulta:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \gamma_w \quad \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \gamma_w - \gamma_w$$

La presencia del agua hace que el terreno experimente un empuje ascensional de intensidad γ_w y su movimiento, cuando la aceleración es despreciable, induce además una fuerza de masa.

$$\bar{f} = (f_x, f_z) = -\gamma_w \cdot \overline{\text{grad } \phi}$$

Normalmente, al producto del peso específico del agua por el gradiente de potencial cambiado de signo, que a veces se denomina l , se le conoce como fuerza de arrastre ($\gamma_w \cdot l$) y va dirigida en dirección normal a las equipotenciales y en el sentido de potenciales decrecientes.

El concepto de las fuerzas de arrastre tiene su aplicación práctica en el análisis tensional de las masas de suelo sumergidas, tal como la que se indica en la Fig. 3.4.4 a modo de ejemplo.

El efecto de las presiones de agua (libre e intersticial) en el contorno es una fuerza F cuyo valor puede calcularse mediante la integral:

$$\bar{F} = \int_c u \cdot \bar{dl}$$

lógicamente es un vector normal al contorno que delimita la masa en cuestión y cuyo módulo es el diferencial de su longitud. Esto es lo que se entiende por la integral de la circulación de u en el contorno.

Cuando se supone que la solución de u es armónica, como viene suponiéndose en estos apartados, la integral de su circulación en el contorno es igual a la integral de su divergencia

$$\left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

dentro de la superficie encerrada por el contorno:

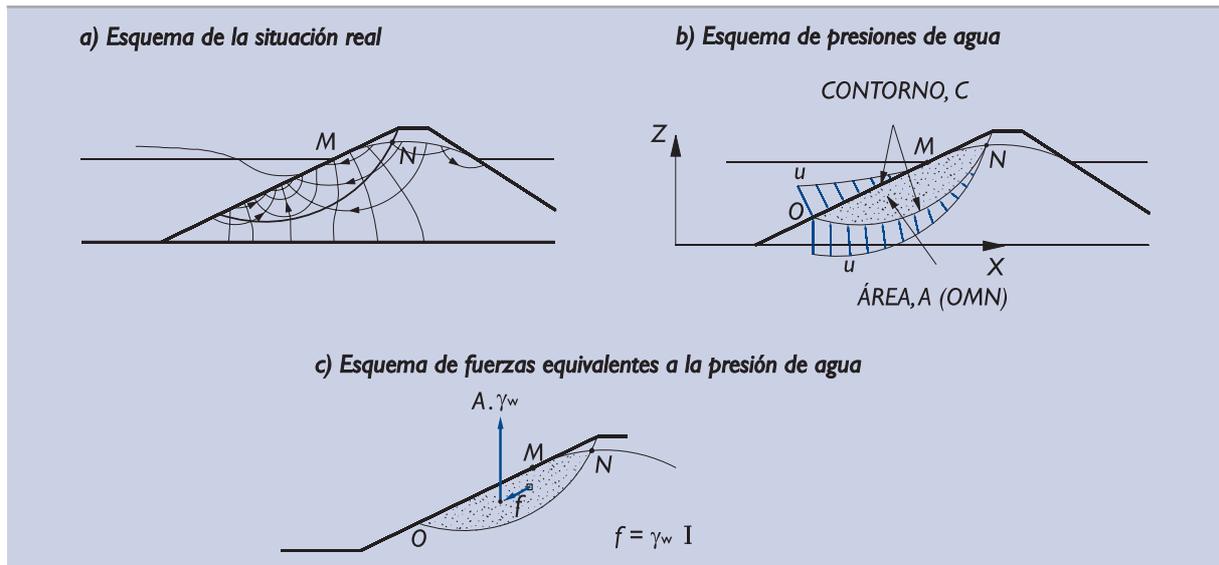
$$\bar{F} = \iint_A \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) \cdot dx \, dz$$

lo que lleva, habida cuenta de las expresiones anteriores, a:

$$\bar{F} = -\gamma_w \iint_A \overline{\text{grad } \phi} \, dx \, dz + A\gamma_w \cdot \bar{k}$$

donde es el vector de módulo unidad dirigido según el eje z.

Figura 3.4.4. Esquema de una red de filtración y de las fuerzas de arrastre correspondientes (Régimen laminar)



Nota: La imposición de la fuerza vertical ascendente $A \gamma_w$ puede hacerse calculando los pesos del área A usando el valor γ' (peso específico sumergido).

Las presiones de agua en todo el contorno tanto externo como interno, por lo tanto, son equivalentes a la suma de dos fuerzas:

- Un empuje ascensional igual al peso del fluido desalojado por la masa. Este efecto puede representarse restando del peso total $A\gamma_{\text{sat}}$ el valor $A\gamma_w$. Esto es, calcular los pesos usando el peso específico sumergido $\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$.
- Unas fuerzas de arrastre por unidad de área (de volumen, en caso de problemas tridimensionales) iguales a $I \cdot \gamma_w$, como antes se ha indicado.

En ocasiones puede ser conveniente eliminar del problema las presiones del contorno y, en su lugar, utilizar pesos específicos sumergidos (en la zona sumergida) y las fuerzas de arrastre indicadas. Esto puede simplificar ciertos análisis, como más adelante se verá en los distintos casos de aplicación en esta ROM.

3.4.6 El problema del levantamiento de fondo

Los cálculos asociados a las excavaciones con agotamiento o a los sistemas de achique permanentes o transitorios suelen estar encaminados a estudiar el posible caudal de achique o las presiones de agua en las estructuras, como ya se ha indicado, o a estudiar el posible levantamiento del fondo, como Estado Límite Último más frecuente.

Comentario: La rotura del terreno en el fondo de excavaciones sometidas a gradientes verticales fuertes es llamada a veces "sifonamiento". En esta ROM ese término se reserva para otro problema causado por el arrastre de partículas o erosión interna.

La solución del problema debe obtenerse consultando la bibliografía existente sobre casos resueltos con geometría similar o bien, si la geometría del problema no es fácil de encontrar, dibujando expresamente la red de flujo correspondiente. En la Fig. 3.4.3 se incluye una solución simplificada de un caso típico de excavación con achique dentro de un recinto, al amparo de paredes tablestacadas. Las fórmulas analíticas correspondientes se indican en la Fig. 3.4.5.

El cálculo de la seguridad frente al levantamiento del fondo, en este tipo de excavaciones entibadas, se recomienda realizarlo mediante la comparación de la densidad sumergida y la componente vertical del gradiente de salida.

$$F = \frac{\gamma'}{l_v \cdot \gamma_w}$$

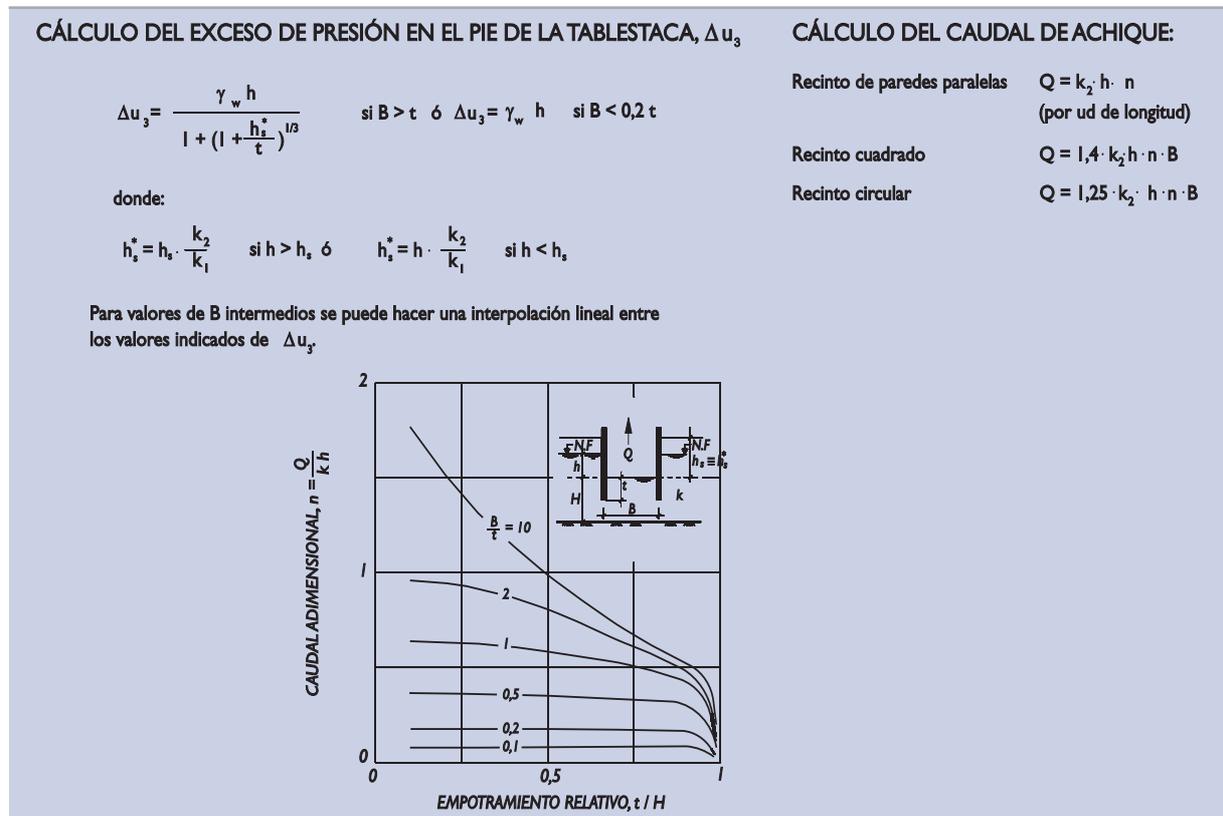
Ese gradiente de salida, l_v , conviene calcularlo como la pérdida unitaria de carga media en la zona próxima a la tablestaca en el fondo de la excavación. Es suficientemente conservador suponer, cuando el suelo es homogéneo:

$$l_v = \frac{\Delta u_3}{\gamma_w \cdot t}$$

donde:

- Δu_3 = exceso de presión intersticial en la punta de la tablestaca.
- t = profundidad de empotramiento de las tablestacas.

Figura 3.4.5. Solución de la filtración al interior de un recinto tablestacado



Nota: Los datos del gráfico corresponden al caso $h_s = 0$. Para $h_s > 0$ los caudales son ligeramente menores.

Se advierte de la peligrosidad de aquellos casos en los que exista una zona menos permeable bajo el fondo de la excavación. En el contacto inferior del estrato impermeable pueden generarse presiones de agua mucho mayores que las correspondientes al caso homogéneo. En esos casos el mencionado gradiente puede llegar a ser:

$$l_v = \frac{h}{d}$$

donde:

h = pérdida de carga total.

d = distancia en vertical del fondo de la excavación al fondo del estrato menos permeable atravesado por las tablestacas.

El problema del levantamiento del fondo de las excavaciones entibadas debe tratarse, a efectos de evaluación de la seguridad, como un estado límite último, ELU, de tipo geotécnico, GEO, pues la configuración del terreno y sus características son determinantes en el problema.

Como consecuencia, las posibles “acciones” deben utilizarse sin mayorar cuando sean de carácter permanente y mayoradas adecuadamente ($\gamma_q = 1,3$ en combinaciones fundamentales) cuando sean variables. Un factor de proyecto fundamental en estos casos es el tirante de agua “h” o desnivel entre el nivel freático en el exterior y el interior del recinto. Tal como se señala en el apartado 3.3.5, tanto a los efectos de la definición de los factores geométricos como de las acciones, los niveles de agua tendrán la consideración de factores de proyecto permanentes y, en consecuencia, no serán objeto de mayoración, independientemente del valor representativo de los mismos que se adopte en función del tipo de combinación considerada (Ver Tabla 3.3.1).

Los coeficientes de seguridad mínimos que conviene exigir frente al problema del levantamiento de fondo son los indicados en la Tabla 3.4.2.

Tabla 3.4.2. Coeficientes de seguridad mínimos frente al levantamiento de fondo. ISA bajo (5 a 19)

Tipo de combinación de acciones	Coefficiente F
Cuasi-permanentes, F1	1,5
Fundamentales, F2	1,3
Accidentales o Sísmicas, F3	1,1

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores de F pueden adecuarse según se indica en el apartado 3.3.8.2.

Estos coeficientes de seguridad mínimos serán considerados siempre que sean obtenidos con este esquema de cálculo simplificado u otros similares que puedan deducirse para otras configuraciones o sistemas de excavación con achique.

3.4.7 Rebajamiento del nivel freático con pozos

Para proyectar rebajamientos del nivel freático mediante pozos es relativamente frecuente utilizar expresiones analíticas que permiten estimar el descenso del nivel freático original causado por un bombeo permanente; son:

$$\Delta = \frac{Q}{2\pi kh} \ln\left(\frac{R}{D}\right) \quad (\text{Flujo confinado})$$

ó

$$\Delta = \frac{Q}{2\pi kH^*} \ln\left(\frac{R}{D}\right) \quad (\text{Flujo libre})$$

donde:

- Δ = descenso del nivel freático en un punto exterior al pozo.
- Q = caudal de achique.
- k = permeabilidad del terreno.
- h = espesor de la zona permeable (casos de flujo confinado).
- H^* = $H - 1/2 \Delta$.
- H = altura del nivel freático original sobre el fondo impermeable (caso de acuífero libre).
- D = distancia del punto en cuestión al eje del pozo.
- R = radio de influencia o distancia del eje del pozo hasta el contorno vertical donde no se produce descenso del nivel freático.

Como quiera que R es difícil de estimar, se suele recurrir a la expresión empírica:

$$R = 300 \Delta_m \sqrt{k}$$

donde:

- Δ_m = máximo rebajamiento del nivel freático.
- k = coeficiente de permeabilidad en cm/s.

El descenso que produce un grupo de varios pozos en un determinado punto se puede estimar con la expresión:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_n \quad (\text{flujo confinado})$$

ó

$$\Delta^2 = (\Delta_1)^2 + (\Delta_2)^2 + \dots + (\Delta_n)^2 \quad (\text{acuífero libre})$$

donde:

- Δ = rebajamiento del nivel freático creado por un grupo de n pozos cuando de cada uno de ellos se extrae, en régimen permanente, un caudal Q .
- Δ_i = rebajamiento del nivel freático en ese punto originado por el pozo "i" cuando únicamente de él se bombea con un caudal permanente igual a Q .

Se advierte de las posibles inexactitudes de esta expresión y de la necesidad de hacer determinaciones más precisas, con los ensayos de campo que sean necesarios, cuando se requiera una estimación segura de alguno de los aspectos del achique.

3.4.8 Arrastres de partículas y erosiones internas

El flujo de agua a través del terreno natural o de los rellenos de tierras artificiales puede provocar arrastre de partículas. Como consecuencia, el terreno (o el relleno) sufre una erosión interna, cambia su estructura y puede llegar a colapsar, ocasionando la ruina de la parte de obra correspondiente. Este problema se denomina también como "sifonamiento" pues, en muchas ocasiones, la erosión se localiza a lo largo de ciertas vías de filtración preferente (tubos) que pueden incluso actuar como sifones.

El problema debe tratarse como un modo de fallo particular que conduce a un estado límite último, ELU, de tipo hidráulico, HYD (ver apartado 3.3.1).

En esta ROM no se indica ningún procedimiento de cálculo del proceso de erosión interna. Únicamente se indican una serie de medidas preventivas para evitarlo.

El problema puede ocurrir en cualquier terreno, pero es especialmente importante en los materiales de relleno artificial que haya de soportar circulación de agua a través de los poros intergranulares de su esqueleto sólido.

Para prevenir arrastres de finos y las consiguientes erosiones internas se deben colocar los debidos filtros protectores, bien de productos artificiales (geotextiles), bien de suelos granulares.

La primera cualidad de los suelos para poder ser utilizados como filtros es su uniformidad. Los suelos poco uniformes sometidos a un flujo de agua pueden segregarse de manera que las partículas finas sean arrastradas por el agua a través de los huecos de las partículas de mayor tamaño ⁽³⁾. Salvo que se disponga de ensayos de laboratorio específicos se consideran segregables aquellos suelos cuyo coeficiente de uniformidad sea superior a veinte.

$$C_u > 20$$

Los suelos granulares (exentos de cohesión) cuyo coeficiente de uniformidad sea menor que el indicado pueden usarse como filtros de otros suelos granulares siempre que se cumpla:

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5$$

donde:

D_{15} = tamaño correspondiente del filtro.

d_{85} = tamaño correspondiente del suelo que se protege.

Si el contenido en finos del suelo a proteger es superior al 10% el tamaño del filtro correspondiente será:

$$0,3 \text{ mm} \leq D_{15} \leq 0,5 \text{ mm}$$

Sólo en casos singulares de protección contra el arrastre de suelos especialmente dispersivos (que se dispersan en partículas muy finas) será justificado disponer filtros más finos. En cualquier caso no se recomienda utilizar filtros cuyo

$$D_{15} < 0,20 \text{ mm}$$

ya que son difíciles de obtener sin que presenten cohesión.

Para evitar el arrastre puede ser necesario colocar más de un filtro en serie hasta que el tamaño medio del grano del último filtro sea estable con la velocidad estimada de agua. Esa estabilidad, ya en la cara externa del material más grueso, se puede aumentar disponiendo un elemento soporte adecuado (rejillas metálicas, obras de fábrica, etc.).

(3) La condición de segregabilidad citada puede expresarse de manera matemática mediante la ecuación siguiente:

$$p_{\text{critico}} = \frac{15}{\log_{10} n} \cong 20$$

donde:

p_{critico} = valor crítico de la pendiente en la curva granulométrica.

n = valor crítico del cociente D_{15}/d_{85} para el que se cumple estrictamente la condición de filtro. Normalmente se supone $n = 5$.

La pendiente de la curva granulométrica en una zona entre dos tamices puede calcularse con la expresión:

$$p = \frac{p_2 - p_1}{\log \frac{D_2}{D_1}}$$

donde p_1, p_2 son los porcentajes, en tanto por ciento, que pasan por los tamices de tamaño de malla D_1 y D_2 correspondientes.

Cuando la pendiente de la curva granulométrica en alguna parte es menor que la indicada como crítica, el suelo debe considerarse especialmente proclive a la erosión interna. La fracción fina correspondiente podría moverse a través de la fracción gruesa. Serían suelos cuya estructura podría ser segregada por el paso del agua.

3.4.9 Arrastres, socavaciones y otras erosiones externas

El problema de la erosión externa del terreno natural o de los rellenos por el movimiento del agua en su superficie es uno de los problemas más investigados en el contexto de la ingeniería marítima y portuaria, al ser muy crítico para la estabilidad en tales clases de obras. Las socavaciones que pueden producirse en el cimiento de las obras de atraque o abrigo, así como los arrastres en los mantos de los diques en talud y en las banquetas de los diques verticales son ejemplos relevantes.

La erosión se produce cuando la velocidad del movimiento del agua, cerca de la superficie del suelo, supera cierto umbral que está fijado por la resistencia del suelo a la erosión externa.

El problema debe tratarse como un modo de fallo particular que conduce a un estado límite último, ELU, de tipo geotécnico, GEO (ver apartado 3.3.1).

El cálculo del perfil de velocidades del agua en cada caso es un problema hidrodinámico cuya consideración se sale del alcance de esta ROM.

La resistencia de los suelos a la erosión puede estudiarse de varias formas. En buen número de situaciones esa resistencia se expresa en términos de velocidad crítica. Esa velocidad representaría el valor a partir del cual se iniciaría el proceso erosivo.

La determinación de las velocidades que provocan erosión en distintos tipos de suelos ha sido investigada por muchos autores, principalmente mediante ensayos en modelos de laboratorio.

Las rocas pueden soportar velocidades altas (> 6 m/s) sin que se inicie el proceso de rotura. Los hormigones de calidad adecuada pueden soportar sin problemas velocidades de ese mismo porte. Pero los suelos cohesivos apenas si admiten velocidades del orden de 1 a 3 m/s si son firmes.

Los suelos granulares y las escolleras basan su capacidad resistente a la erosión en el peso propio, y por eso suele usarse como parámetro resistente representativo de la erosión el tamaño medio o el peso específico. Las fórmulas más usuales que permiten conocer la velocidad crítica son del siguiente tipo:

$$v_{\text{crit}} = [A \cdot g (G-1) D_{50}]^{1/2}$$

donde:

v_{crit} = velocidad crítica que indica el proceso erosivo.

A = parámetro adimensional que depende del tipo de movimiento del agua y de la forma de los granos.

g = aceleración de la gravedad.

G = peso específico relativo de las partículas del suelo (γ_s/γ_w).

D_{50} = diámetro del tamiz que deja pasar el 50% del peso del suelo.

Para conocer valores del parámetro A conviene consultar la bibliografía técnica. Aquí sólo se adelanta, a título orientativo, que su valor suele estar comprendido entre 0,5 y 1.

Cuando se desencadena el proceso erosivo, el suelo es transportado por el agua como carga de fondo. Las partículas ruedan o deslizan permaneciendo en contacto permanente junto con otras partículas que pueden desligarse de la masa móvil.

Cuando la erosión se produce en el entorno de un obstáculo que provoca una ampliación local de la velocidad del movimiento, se puede producir una socavación puntual de profundidad importante, hasta producirse la situación en la que el propio cambio geométrico provocado por la erosión reduzca las velocidades y atenúe el proceso erosivo.

El cálculo de las profundidades de erosión es posible pero los resultados no son fiables. Generalmente cuando el problema puede ser crítico se recurre a disponer una protección que evite que el proceso se inicie. En

todo caso, el problema de la definición de la profundidad de erosión depende claramente del tipo de obra y será en los documentos ROM específicos o en la parte 4 de esta ROM donde puedan verse más referencias a este problema.

3.4.10 Consolidación de masas de suelo

3.4.10.1 Formulación básica

Los suelos con un contenido apreciable de finos suelen tener una permeabilidad suficientemente pequeña como para que el movimiento del agua causado por cualquier desequilibrio tarde un tiempo considerable en alcanzar un régimen estacionario de filtración o el régimen hidrostático correspondiente. Esta demora puede ser causa de problemas geotécnicos ya que retrasa el crecimiento de la resistencia al corte, que puede ser necesaria para otros fines, y produce asientos diferidos a largo plazo.

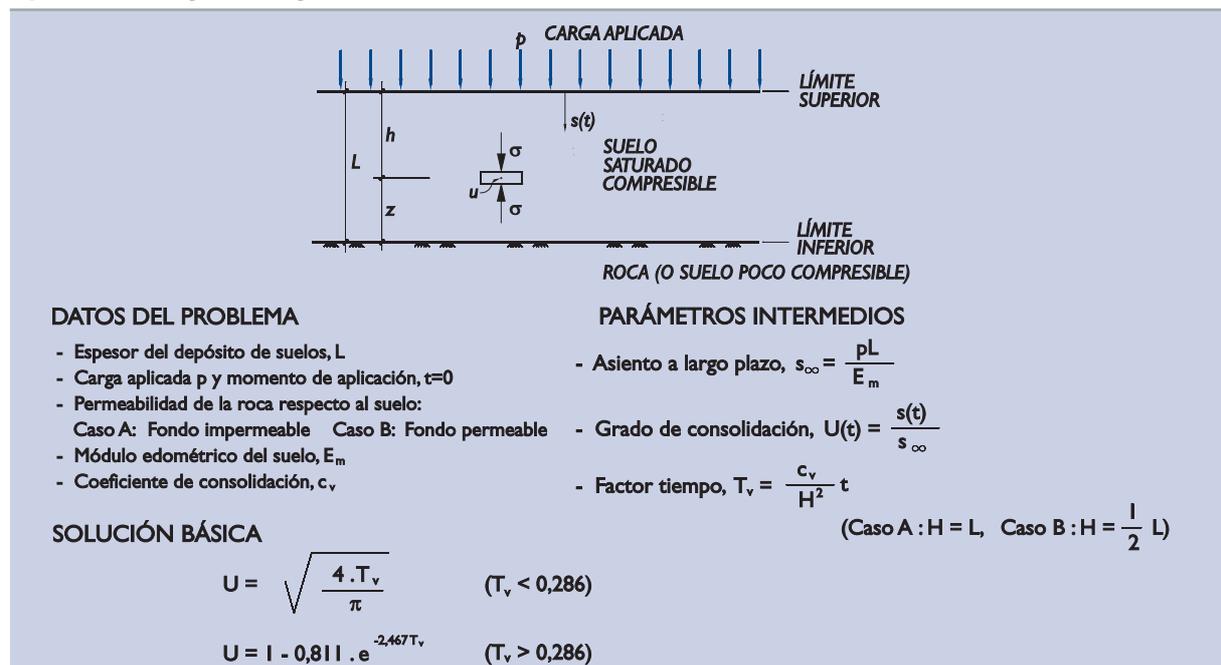
De naturaleza similar es el problema que pueden causar los achiques o rebajamientos del nivel freático, ya que la modificación del estado del agua en el terreno puede ser causa de asientos que a su vez pueden afectar a estructuras de su entorno.

Estos problemas suelen analizarse mediante un modelo de comportamiento simplificado que implica la validez de la ley de Darcy (definida en el apartado 2.2.6), el principio de la presión efectiva de Terzaghi (definido en el apartado 2.2.8), así como la validez de una relación lineal entre tensiones y deformaciones.

Con esas hipótesis es posible resolver una serie de situaciones con expresiones semianalíticas publicadas en la literatura técnica y de las que aquí se apuntan sólo las ideas principales.

El problema genérico estriba en conocer, en un tiempo "t" cualquiera, el estado de presiones intersticiales dentro del terreno, así como el asiento de la superficie. Serían conocidas la geometría del depósito de suelos y sus características geotécnicas, así como la acción externa causante del proceso de consolidación. En la Fig. 3.4.6 se indica una solución analítica aproximada de la teoría de la consolidación unidimensional. También puede usarse la solución semianalítica que suele figurar en los textos elementales de mecánica del suelo, con ayuda de tablas y gráficos.

Figura 3.4.6. Esquema del problema de consolidación unidimensional



3.4.10.2 Los excesos de presión intersticial

Al comienzo de la consolidación el hecho de haber provocado una perturbación, equivalente a una carga “p” sobre el límite superior del suelo blando en estudio, hace que la presión intersticial aumente en todos los puntos una misma cantidad.

$$(\Delta u)_{t=0} = p$$

A medida que pasa el tiempo ese incremento de presión va desapareciendo, más rápido cerca de los bordes que sean drenantes y más lentamente en el centro del estrato (si está drenado por ambas caras) o en el borde inferior (si éste resulta impermeable).

La máxima presión intersticial, dentro del estrato blando, pasado cierto tiempo se puede aproximar mediante la expresión:

$$\Delta u_{\text{máx}} = 1,5 p (1 - U) \quad U > 0,4$$

donde:

- p = carga aplicada en el borde superior.
- U = grado de consolidación en tanto por uno.

Con esa expresión aproximada puede verse que, cuando ya se lleva el 50% de la consolidación ($U = 0,5$), el exceso de presión puede ser tan alto como el 75% del exceso inicial. Esta forma de disiparse las presiones hace que la resistencia de un estrato (controlado por su zona más débil) crezca a menos ritmo que el indicado por el grado de consolidación U.

El tiempo necesario para alcanzar el 50% de la consolidación (esto es, para que el asiento sea ya la mitad del esperado a largo plazo) es:

$$t = 0,196 \frac{H^2}{c_v}$$

donde:

- H = distancia más larga hasta el drenaje.
- c_v = coeficiente de consolidación del suelo.

De esa expresión se deduce que la distancia hasta el drenaje es el elemento geométrico clave que controla la velocidad del proceso de consolidación. La introducción artificial de drenes de arena, que permiten el flujo horizontal, o la existencia natural o artificial de lechos de arena más permeables, reduce considerablemente el valor de “H” (la solución en esos casos es distinta pero similar a la indicada, ya que viene controlada por el mismo factor tiempo) y, por lo tanto, acelera notablemente la consolidación.

La solución de la teoría de la consolidación con geometrías más complejas (incluyendo flujo horizontal o problemas tridimensionales o leyes de tensión-deformación no lineales, etc.) ha de buscarse en textos especializados y puede requerir el uso de programas de ordenador adecuados.

En el apartado 3.9.2.4 se considera el caso particular de consolidación con ayuda de drenes artificiales verticales.

3.4.10.3 Subsistencia creada por los achiques

El rebajamiento del nivel freático hace que las capas de suelo situadas por debajo del nivel freático original aumenten su presión efectiva en la cantidad:

$$p = \Delta \cdot [\gamma_w - (\gamma_{\text{sat}} - \gamma_{\text{ap}})]$$

donde:

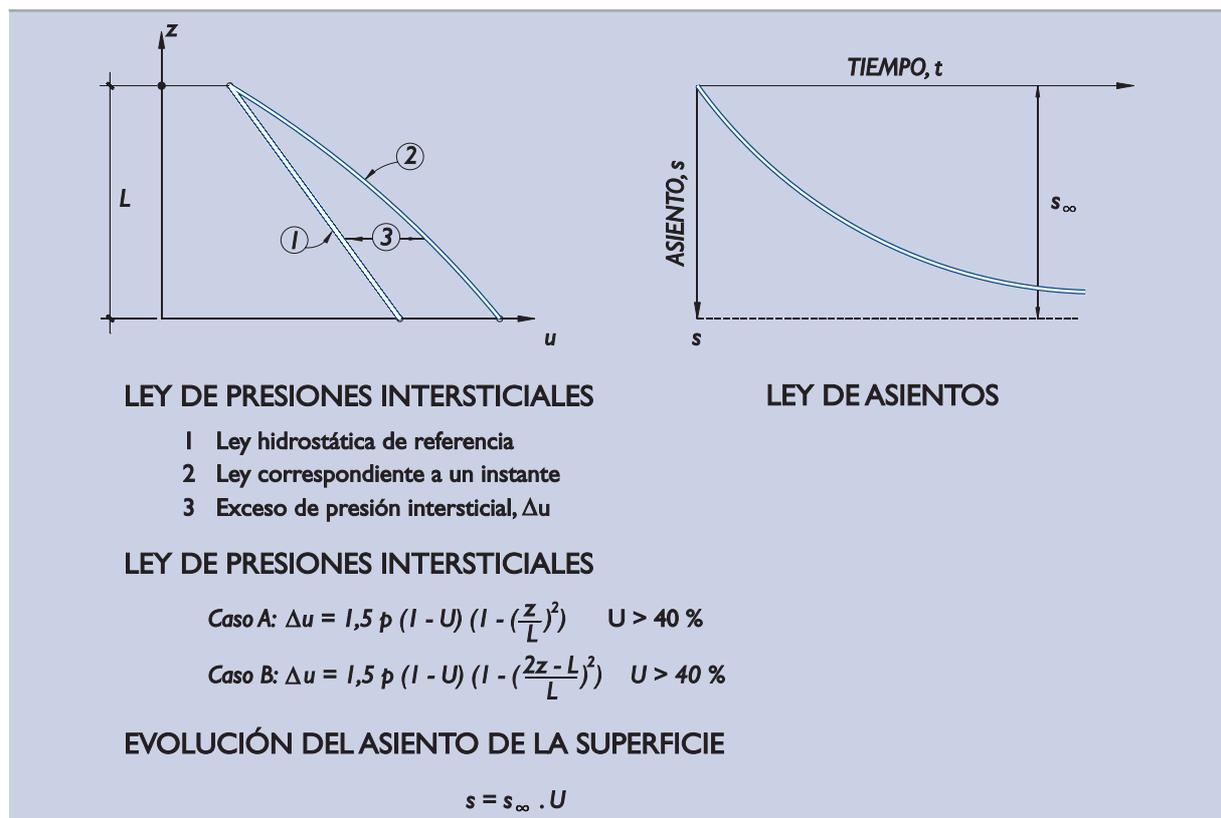
- Δ = descenso del nivel freático.
 γ_{sat} = peso específico saturado del terreno en la zona de oscilación del nivel freático.
 γ_{ap} = peso específico aparente del terreno en la zona de oscilación del nivel freático después del descenso.
 γ_w = peso específico del agua.

Esa carga “p” hace que los suelos situados por debajo del nivel freático se compriman y, si la permeabilidad es pequeña y el módulo de deformación también pequeño, pueden resultar plazos de asiento largos.

Independientemente de que la causa de asiento sea el rebajamiento del nivel freático o la colocación de una carga, el proceso de consolidación del estrato inferior afectado queda controlado por las mismas condiciones y por lo tanto puede aplicarse las mismas soluciones.

Se hace la advertencia de que en este caso de rebajamiento del nivel freático, si se aplica la solución descrita en las Figs. 3.4.6 y 3.4.7, ha de considerarse que la ley hidrostática de referencia debe ser la correspondiente al nivel freático ya rebajado.

Figura 3.4.7. Esquema del problema de consolidación unidimensional (Continuación)



Nota: En estas expresiones U es el grado de consolidación medio, que depende del tiempo según se indica en la Fig. 3.4.6.

Los asientos provocados por los achiques se pueden estimar con las mismas expresiones que los correspondientes a la consolidación bajo una carga “p”. Sobre estos asientos se hacen, a continuación, algunas observaciones.

3.4.10.4 Los asientos de consolidación

El acortamiento que se produce en un estrato de espesor “L” a largo plazo y debido al aumento de la presión «p» sobre su superficie superior es:

$$s_{\infty} = \frac{p \cdot L}{E_m}$$

Para que esta expresión sea suficientemente precisa es necesario que la carga sea suficientemente extensa, de manera que el problema pueda considerarse unidimensional.

El módulo edométrico, E_m , debe obtenerse de ensayos de campo o de laboratorio (ensayos edométricos) para el mismo rango de presiones que existan en la realidad, esto es, entre:

$$P_{\text{inicial}} \text{ y } (P_{\text{inicial}} + p)$$

donde:

P_{inicial} = tensión vertical efectiva antes de colocar la carga “p”.

Como quiera que la tensión vertical efectiva es variable con la profundidad, se puede optar por tomar como valor medio representativo el correspondiente al punto central del estrato o dividir éste en varios tramos y aplicar ese criterio, después, en cada tramo.

La solución sencilla antes apuntada es válida para suelos homogéneos en los que el coeficiente de consolidación, c_v , es único.

$$c_v = \frac{k \cdot E_m}{\gamma_w}$$

La presión vertical inicial será distinta en cada profundidad y, por lo tanto, el módulo edométrico también variará con la profundidad. A pesar de ello, es aceptable suponer que c_v es constante. La variación de E_m puede estar compensada con otra análoga y de sentido contrario de la permeabilidad, k , y seguir manteniendo la hipótesis de constancia del coeficiente de consolidación (de hecho, es esperable también que los suelos aumenten su módulo y disminuyan su permeabilidad a medida que avanza el proceso de consolidación).

Con estas teorías sencillas o simplificadas y con buenos datos de laboratorio, es difícil reducir a menos del 30% el rango del posible error en los cálculos de asientos. La estimación de tiempos de consolidación es menos precisa. Aún con buenos ensayos de laboratorio, si no existen experiencias previas similares, no será fácil estimar tiempos. Los tiempos de consolidación reales pueden ser, en situaciones bien analizadas, entre la mitad y el doble del estimado. Las predicciones de los cálculos de consolidación deben ser contrastadas, siempre que este aspecto resulte de trascendencia en la obra, con la observación posterior o incluso con pruebas de carga específicas.

La observación de la evolución de los asientos en superficie no permite conocer con certeza el grado de consolidación alcanzado ni, por lo tanto, el asiento total que puede producirse, salvo que se espere mucho tiempo y se pueda observar una tendencia clara hacia la estabilización del proceso. Esto ocurre con grados de consolidación altos, del orden del 80%.

Con objeto de interpretar antes y mejor los procesos de consolidación, será preciso obtener más información. La auscultación y el seguimiento de la evolución de las presiones intersticiales a distintas profundidades es una práctica recomendable a estos efectos.

En los apartados 3.9.2.5 y 4.9.7 se indican recomendaciones adicionales sobre la observación e interpretación de los datos obtenidos en procesos de consolidación instrumentados.

3.4.11 Presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del nivel del mar

La acción del oleaje y de otras oscilaciones del nivel del mar, bien directamente o bien transmitida al terreno de cimentación a través de la estructura resistente, genera en el suelo o en los rellenos modificaciones en las presiones totales y en las presiones intersticiales y, en consecuencia, también movimientos de parte del agua que lo satura.

El conocimiento de estas modificaciones es de particular importancia para la verificación de la estabilidad de muchas estructuras portuarias (diques en talud, banquetas de cimentación, etc.). A su vez, estudios teóricos y experimentales realizados indican que el oleaje durante un temporal puede producir, en algunos suelos especialmente susceptibles (p.e. arenas finas en situación no drenada), aumentos importantes de las presiones intersticiales que lleven a la licuefacción, al sifonamiento o al deslizamiento del terreno. Es conveniente que, en estos casos, el ingeniero tome especial cuidado en evitar que estos efectos se puedan producir.

La solución de este tipo de problemas es complicada, dependiendo de la naturaleza y el comportamiento del suelo frente a la acción dinámica del oleaje y demás oscilaciones del mar, y generalmente requerirá el uso de modelos analíticos o numéricos complejos, cuya consideración se sale del alcance de esta ROM (ver ROM 1.1). No obstante, para algunos casos concretos (problemas desacoplados), son admisibles soluciones aproximadas, algunas de las cuales se describen en esta ROM.

3.4.11.1 Distribución de presiones intersticiales en fondos marinos

SOLUCIÓN ANALÍTICA SIMPLIFICADA. FLUJO Y DEFORMACIÓN DESACOPLADOS

Existen soluciones sencillas, analíticas, al problema de flujo en el medio poroso cuando éste se puede desacoplar de la deformación del suelo y también cuando el caudal de agua que entra y sale del suelo es pequeño. En esas situaciones sencillas se puede suponer que la condición de contorno en la superficie del fondo marino es la correspondiente a terreno rígido e impermeable.

Esta aproximación puede considerarse suficientemente válida para los dos supuestos alternativos siguientes:

- El terreno se comporta como impermeable, el agua es incompresible y, como consecuencia, no se producen cambios de volumen en el interior del terreno. Este supuesto es el que normalmente se describe en geotecnia como “situación sin drenaje”.
- El terreno es permeable pero indeformable, de manera que tampoco se producen cambios de volumen al moverse el agua, aunque cambien las presiones efectivas. Este supuesto se ha hecho también en los apartados precedentes para obtener redes de filtración partiendo de soluciones armónicas del campo de presiones intersticiales.

En cualquiera de estas dos hipótesis extremas puede considerarse que la presión que ejerce el agua sobre el fondo marino es la que se indica en la Fig. 3.4.8. Es decir, considerando la teoría lineal de ondas y oleaje progresivo, el incremento de la presión sobre el fondo en un emplazamiento determinado puede tomarse como:

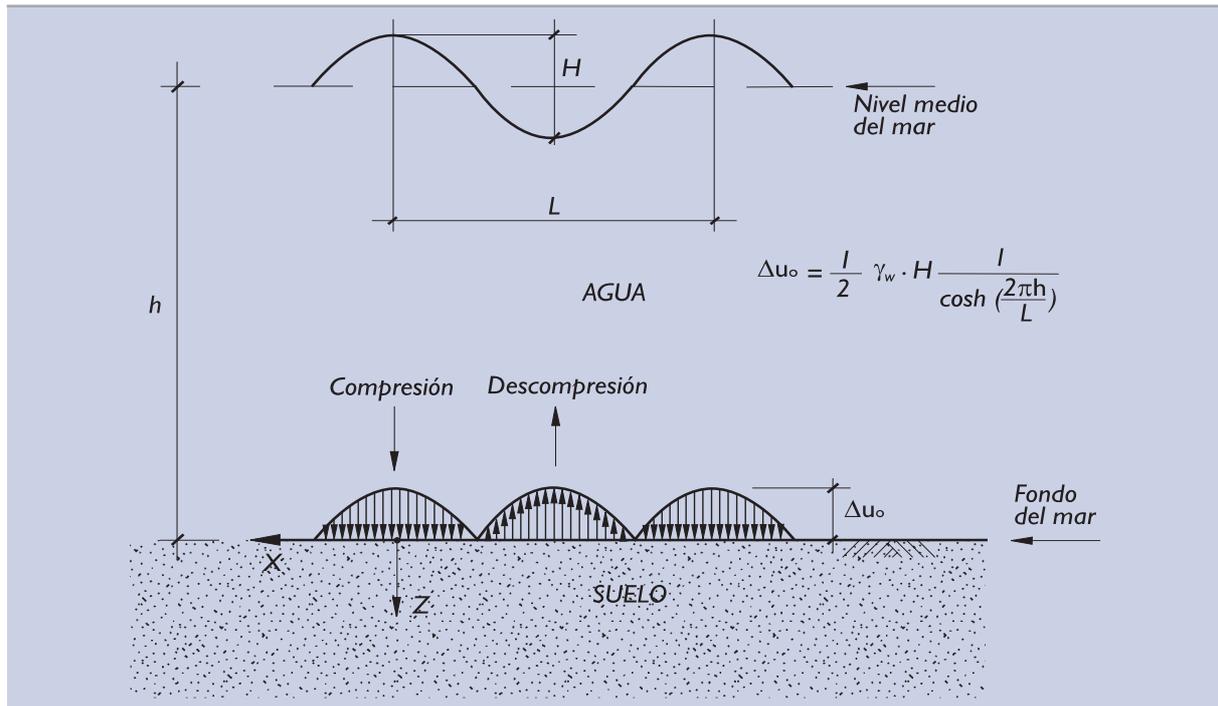
$$\Delta u = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot H \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \cos(Kx - \omega t)$$

siendo:

- H = altura de ola.
- L = longitud de onda (fondo impermeable).
- T = periodo de la ola.
- h = profundidad en el emplazamiento.

- K = número de onda ($2\pi/L$).
 ω = frecuencia angular ($2\pi/T$).
 γ_w = peso específico del agua.
 x = abscisa del punto en cuestión, medido desde la vertical de una cresta de la ola.
 t = tiempo.

Figura 3.4.8. Incremento de la presión sobre el fondo debido al oleaje por un tren de ondas progresivo en profundidades indefinidas (Terreno rígido e impermeable)



Con esta consideración la solución aproximada, en tensiones totales, neutras y, en consecuencia, también en efectivas, es independiente de las características mecánicas del suelo y del agua. Esa solución es la que se describe a continuación.

Si se desprecian las aceleraciones, la solución del problema mecánico tiene expresión analítica en presiones totales. Esa solución, para un fondo marino de profundidad indefinida, es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_x &= \Delta u_0 (1 - Kz) e^{-Kz} \cdot \cos(Kx + \omega t) \\
 \Delta\sigma_z &= \Delta u_0 (1 + Kz) e^{-Kz} \cdot \cos(Kx + \omega t) \\
 \Delta\tau_{xz} &= \Delta u_0 \cdot Kz \cdot e^{-Kz} \cdot \sen(Kx + \omega t)
 \end{aligned}$$

El círculo de Mohr correspondiente al incremento de presiones totales inducidas por este oleaje tiene como centro y radio (presión media p y desviador q) los valores siguientes:

$$\begin{aligned}
 p &= \Delta u_0 \cdot e^{-Kz} \cdot \cos(Kx + \omega t) \\
 q &= \Delta u_0 \cdot Kz \cdot e^{-Kz}
 \end{aligned}$$

Como puede verse, el tamaño del círculo de Mohr es independiente del tiempo y de la abscisa del centro del círculo, sólo depende de la profundidad. Además, alcanza un máximo para $Kz = 1$ cuyo valor es $q_{\max} = \Delta u_0/e$, siendo e la base de los logaritmos naturales ($e = 2,718$).

PRESIONES INTERSTICIALES EN PROFUNDIDAD CONSIDERANDO LECHOS HOMOGÉNEOS DE GRAN ESPESOR

La solución precedente en presiones totales es independiente de las características del terreno, basta con que sea homogéneo, e isótropo, que se cumpla una de las dos condiciones a) o b) antes indicadas y que las aceleraciones sean despreciables para que las fórmulas indicadas sean válidas.

En la solución de interés que corresponde a la condición de no drenaje (volumen del esqueleto del suelo constante) se cumple:

$$\Delta u = p = \Delta u_0 \cdot e^{-Kz} \cdot \cos (Kx + \omega t)$$

Los cambios de tensiones efectivas inducidas por el oleaje serían:

$$\Delta \sigma'_x = -\Delta u_0 Kz \cdot e^{-Kz} \cdot \cos (Kx + \omega t)$$

$$\Delta \sigma'_z = \Delta u_0 Kz \cdot e^{-Kz} \cdot \cos (Kx + \omega t)$$

$$\Delta \tau_{xz} = \Delta u_0 Kz \cdot e^{-Kz} \cdot \text{sen} (Kx + \omega t)$$

Como puede verse, el círculo de Mohr correspondiente a esta variación de presiones efectivas está siempre centrado en el origen y su radio cambia exclusivamente con la profundidad, como antes se dijo.

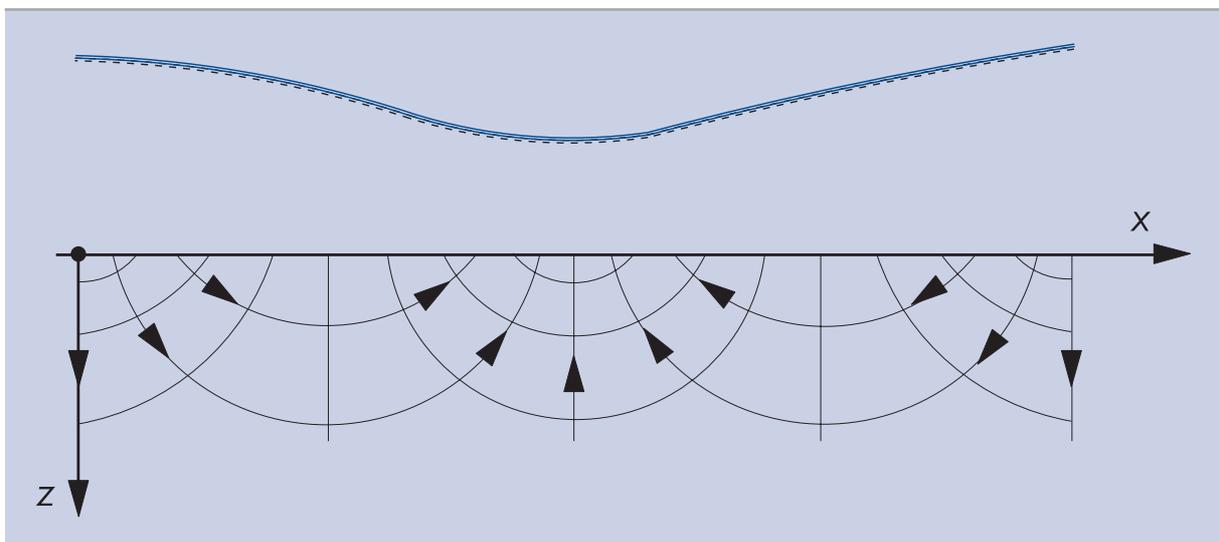
En la superficie del terreno ($z = 0$) la presión efectiva vertical y la tensión de corte son nulas. Los gradientes de sus crecimientos en profundidad son $(\partial q/\partial z) = K \cdot \Delta u_0$, para la tensión de corte inducida bajo el seno de la ola, y γ' para la presión vertical efectiva. De aquí se deduce que el valor τ/σ'_v máximo que puede inducir el oleaje es:

$$\frac{\tau}{\sigma'_v} \leq \frac{K \Delta u_0}{\gamma'} = \frac{2\pi \Delta u_0}{L \cdot \gamma'}$$

Esta solución analítica tiene aplicación cuando se analiza la rotura de fondos arenosos sometidos a cargas cíclicas (apartado 3.10) cuyo criterio de rotura se establece en términos de τ/σ'_v .

La red de filtración que se establece en el terreno tiene la forma que se indica en la Fig. 3.4.9.

Figura 3.4.9. Red de filtración instantánea correspondiente a la acción del oleaje sobre un fondo marino homogéneo e isótropo



Las ecuaciones de las isobaras de igual exceso de presión intersticial y las líneas de corriente ortogonales son:

$$e^{-Kz} \cos Kx = \frac{\Delta u}{\Delta u_0} \quad (\text{isopiezas})$$

$$e^{-Kz} \sin Kx = \frac{\Delta Q}{k \Delta u_0 \gamma_w} \quad (\text{líneas de corriente})$$

donde Δu es el incremento de presión de la isobara correspondiente y ΔQ el valor del incremento de caudal correspondiente a las líneas de corriente.

El caudal que se mueve en un tramo de longitud igual a la longitud de ola es:

$$Q = \frac{2k \Delta u_0}{\gamma_w}$$

siendo k el coeficiente de permeabilidad.

El gradiente de la filtración tiene un módulo constante en cada profundidad.

$$I = \frac{2\pi \Delta u_0}{\gamma_w \cdot L} e^{-Kz}$$

y su dirección da una vuelta completa cada vez que cambia el tiempo una cantidad T .

El gradiente hidráulico de salida del agua que podría provocar el levantamiento de fondo es $I = \gamma' / \gamma_w$ siendo γ' el peso específico sumergido del suelo. Comparado este gradiente crítico con el máximo gradiente que se obtiene de la expresión anterior (que ocurre para $z = 0$ bajo el seno de la ola), conduce a la condición crítica de levantamiento de fondo.

$$\Delta u_0 = \frac{\gamma' L}{2\pi}$$

usando la relación que existe entre Δu_0 y los datos de la ola se obtiene:

$$\frac{\pi H}{L} \leq \cosh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \cdot \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

como condición necesaria para evitarlo.

EFFECTO DE LA COMPRESIBILIDAD Y PERMEABILIDAD DEL SUELO

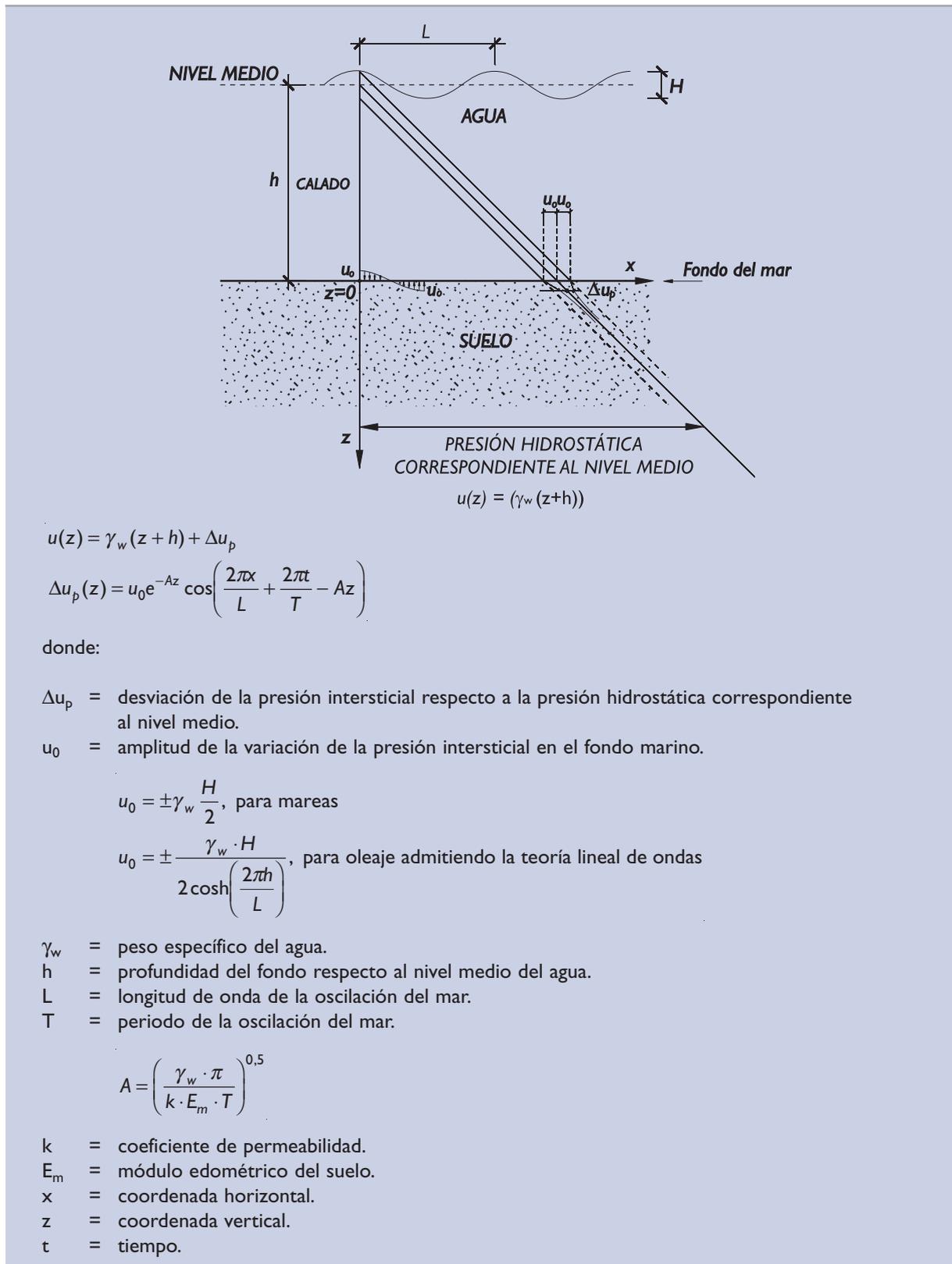
La situación real de los fondos marinos no obedece generalmente a las hipótesis simplificadoras que se han mencionado y entonces entran en juego la deformabilidad y la permeabilidad del terreno, así como la capacidad de drenaje del mismo en relación con el periodo de la acción oscilatoria actuante. En estas condiciones más generales, el parámetro adimensional que controla el proceso es:

$$C = \frac{c_v T}{D^2}$$

donde

- c_v = coeficiente de consolidación.
- D = dimensión característica.
- T = periodo de la oscilación del mar.

Figura 3.4.10. Estimación de la variación en la Ley de Presiones Intersticiales del fondo marino para situación drenada bajo la acción del oleaje u otras oscilaciones del mar (de Rouck, 1991)*



*: de Rouck, J. 1991. "De Stabiliteit Van Stortsteengolfbrekers. Algemeen Glijdingsevenwicht - Een Nieuw Deklaagelement", Hydraulic Laboratory, University of Leuven, Belgium.

La dimensión característica, D , necesaria para obtener el parámetro adimensional, C , es teóricamente la distancia hasta el drenaje del punto en cuestión. Esa distancia podría ser alguna de las siguientes:

- ◆ Profundidad del punto en cuestión bajo el fondo del mar.
- ◆ Espesor del estrato de suelos si es que éste tiene un límite inferior (roca por ejemplo) y ese límite es impermeable.
- ◆ Mitad del espesor de suelos del ítem precedente si el estrato en cuestión está drenado por ambas caras.

Cuando el valor de C resulte claramente mayor que la unidad, puede suponerse que la evolución de presiones intersticiales en el fondo se reproduce enteramente y sin desfase dentro del terreno. Esto ocurrirá generalmente con oscilaciones de periodo largo o muy largo en terrenos muy permeables y muy rígidos. En este caso las presiones intersticiales generadas podrán obtenerse estableciendo la correspondiente red de filtración en condiciones de flujo estacionario.

Cuando el valor de C resulte del orden de 0,01 o inferior puede suponerse, a efectos prácticos, que el suelo no drena y que las presiones intersticiales generadas son las indicadas en el apartado precedente correspondiente a terreno de permeabilidad nula (situación sin drenaje).

Para situaciones intermedias el problema acoplado de flujo-deformación en el medio poroso habrá de analizarse con algún modelo analítico o numérico, o mediante su observación en prototipo mediante técnicas de auscultación (Ver ROM I.1). No obstante, dada la complejidad de estos cálculos, puede ser recomendable realizar en estos casos los cálculos geotécnicos en tensiones totales. Esto permite no tener que entrar en la estimación de las leyes de presiones intersticiales.

Una solución simplificada a este problema es la dada por de Rouck (1991), la cual goza de cierta difusión. Se resume en la Fig. 3.4.10. Con esta formulación puede observarse que las presiones intersticiales dependen de la profundidad relativa (h/L), estabilizándose en el valor de la presión hidrostática correspondiente al nivel medio a partir de una cierta profundidad, función creciente de la permeabilidad, de la compacidad del suelo y del periodo de la oscilación del mar. Por tanto, las variaciones en las presiones intersticiales debidas a las mareas se atenúan muy lentamente con la profundidad en terrenos permeables; atenuándose, por el contrario, más rápidamente en terrenos menos permeables. Por el contrario, las debidas al oleaje se atenúan mucho más rápidamente en todo tipo de terreno, teniendo, por tanto, incidencia en un espesor más limitado del suelo.

De acuerdo con lo señalado en este apartado, el comportamiento del suelo frente a la acción del oleaje progresivo (periodo en el rango entre 5 y 20 s) será por lo general, en condiciones no drenadas para suelos saturados granulares finos. Las arenas medias podrán considerarse en condiciones parcialmente drenadas y las arenas gruesas, gravas y escolleras en condiciones totalmente drenadas. Para oscilaciones del mar de mayor periodo (p.e. mareas) el comportamiento del suelo será por lo general, en condiciones drenadas para suelos granulares y escolleras y en condiciones no drenadas para suelos cohesivos.

3.5 CIMENTACIONES SUPERFICIALES

3.5.1 Tipos de cimentación

Las cimentaciones superficiales son aquéllas en las que el plano de contacto entre la estructura y el terreno está situado bajo el terreno que la rodea a una profundidad que resulta pequeña cuando se compara con el ancho de la cimentación. De hecho, cuando esa profundidad y el ancho de la cimentación son del mismo orden, entonces las fórmulas y procedimientos que aquí se indican pueden ser ya muy conservadores.

Normalmente el terreno que rodea la cimentación estará a un nivel semejante en ambos lados. Las cimentaciones de estructuras de contención, con un gran desnivel de tierras a uno y otro lado de la cimentación son también analizables por los procedimientos descritos aquí. En cualquier caso, para los cálculos que aquí se especifican, se tomará como nivel de tierras alrededor del cimientto el más bajo que se considere posible junto a alguno de los lados del cimientto.

Existen varias tipologías básicas de cimentación superficial, entre ellas:

a. Mediante zapatas aisladas o arriostradas.

Son típicas en cimentaciones de edificios o estructuras sustentadas por pilares. Las riostras que unen las distintas unidades no suelen reducir notablemente las cargas verticales que actúan en cada zapata y, por lo tanto, a efectos de hundimiento y de asentos, éstas pueden considerarse individualmente.

b. Mediante zapatas corridas rígidas.

Son típicas en la cimentación de muros o estructuras de contención de gravedad (muelles de bloques, o cajones, por ejemplo).

La rigidez de la propia estructura hace que, para el cálculo de asentos, se pueda despreciar su deformación.

c. Mediante zapatas corridas flexibles

Son típicas en las cimentaciones de estructuras soportadas mediante pilares en terrenos de capacidad portante reducida que no permiten las cimentaciones aisladas. También pueden resultar interesantes por razones constructivas o incluso por razones económicas. Serían equivalentes a las cimentaciones descritas en a) con riostras y zapatas integradas en un mismo elemento, que sería una viga o zapata corrida. Las vigas corridas pueden ir en una sola dirección, arriostradas o no, o en dos o más direcciones, cruzándose y arriostrándose entre sí.

Es de esperar, en general, que el efecto de interacción suelo-estructura tenga un papel importante en los esfuerzos en la cimentación y, por eso, en este tipo de cimientos se debe tener presente ese efecto.

d. Mediante losa

Este tipo de solución es habitual en suelos que presentan escasa capacidad portante para cimentaciones aisladas o mediante vigas corridas. También pueden adoptarse soluciones en losa por otras razones muy diversas.

Las losas pueden ser planas o de canto variable o incluso nervadas. Los espesores de hormigón que se utilizan normalmente hacen necesario considerar el efecto de interacción suelo-estructura para evaluar los esfuerzos en la cimentación.

La Fig. 3.5.1 indica esquemáticamente estos tipos de cimentación.

Las cimentaciones semiprofundas, cuya profundidad mínima de cimentación es varias veces mayor que su anchura, pueden estudiarse con los procedimientos que aquí se indican despreciando parte del empotramiento en el terreno. En la literatura técnica existen procedimientos especiales para evaluar la mejora que la profundidad adicional introduce y su consulta puede ser de interés en algunos casos. El límite de esa mejora se puede estimar asimilando la cimentación semiprofunda a una cimentación profunda y siguiendo los procedimientos explicados en el apartado 3.6.

3.5.2. Modos de fallo

3.5.2.1 Estados Límite Últimos

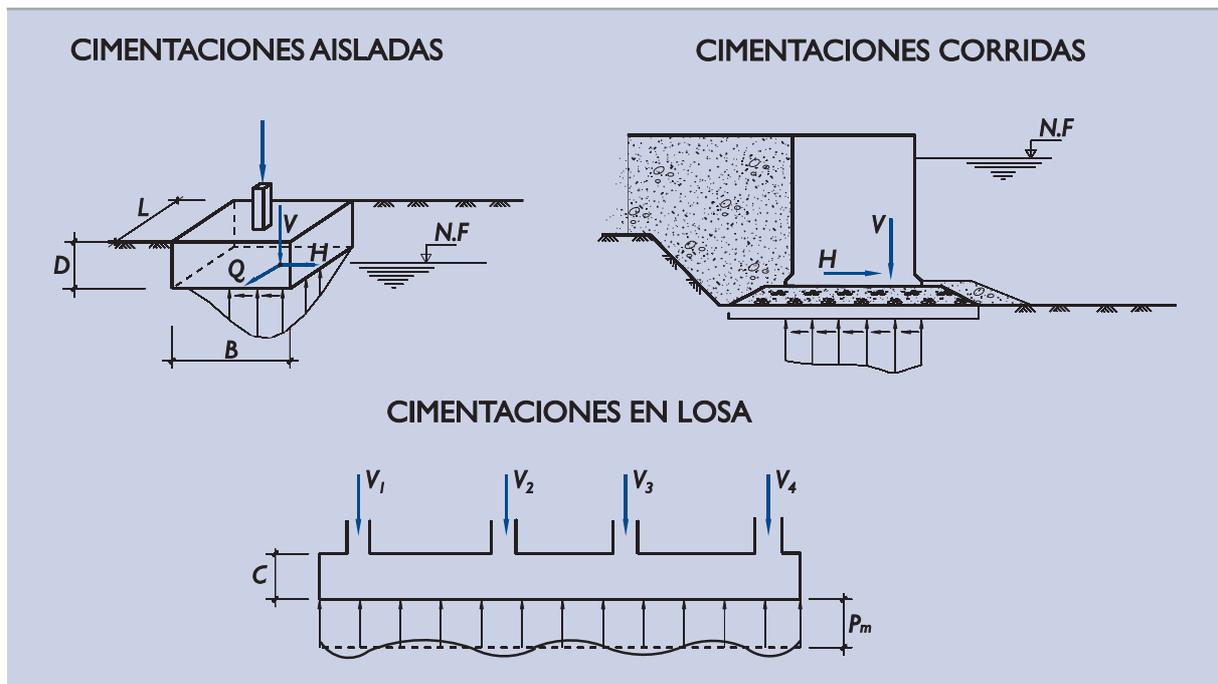
Los Estados Límite Últimos que se consideran en esta parte, aún general de la ROM 0.5, son aquéllos de tipo geotécnico (GEO) que quedan controlados esencialmente por la resistencia del terreno.

Los modos de fallo que, en todo caso, deben plantearse para analizar la fiabilidad de una cimentación superficial son los siguientes:

a. Estabilidad global

La estructura y su cimiento pueden fallar globalmente sin que se produzcan, antes, otros fallos locales. Este tipo de rotura es típico de cimentaciones en taludes de diques o en banquetas. Este problema de la estabilidad global se analizará con los procedimientos que se indican en 3.8.

Figura 3.5.1. Algunas formas típicas de cimentación



b. Hundimiento

Este fallo del terreno puede ocurrir cuando la carga actuante sobre el terreno, bajo algún elemento del cimiento, supera la carga de hundimiento, sobre cuya estimación se hacen recomendaciones más adelante.

c. Deslizamiento

El contacto de la cimentación con el terreno puede estar sometido a tensiones de corte. Si éstas superan la resistencia de ese contacto, se puede producir el deslizamiento entre ambos elementos, cimentación y terreno.

d. Vuelco plástico

El vuelco es típico de estructuras cimentadas sobre terrenos cuya capacidad portante es mucho mayor que la necesaria para sostener la cimentación; de otra forma, antes de producirse el vuelco se provocaría el hundimiento del cimiento. Este último mecanismo (plastificación local del cimiento cerca de una arista) es el denominado vuelco plástico.

Además de estos modos de fallo, geotécnicos, en esta ROM se hará alguna consideración de otros modos de fallo afines correspondientes a otros Estados Límite Últimos de carácter no estrictamente geotécnico. Entre ellos se considerará la capacidad estructural del cimiento. Los esfuerzos en los elementos estructurales que componen el cimiento, igual que cualquier otro elemento estructural, pueden sobrepasar su capacidad resistente. Los Estados Límite Últimos que, en ese sentido, deben considerarse son los mismos que en el resto de los elementos estructurales.

3.5.2.2 Estados Límite de Servicio

Los Estados Límite de Servicio que requieren análisis de tipo geotécnico son los asociados con la deformabilidad del terreno o con su vibración excesiva. Las limitaciones de movimiento o los movimientos máximos admisibles deben estipularse en cada caso. En esta parte de la ROM sólo se indican algunos criterios generales dentro del apartado 3.5.7.4.

3.5.2.3 Otros problemas de las cimentaciones superficiales

En esta parte de la ROM 0.5 se dan criterios sobre los procedimientos de análisis correspondientes a los modos de fallo más comunes (estabilidad global, hundimiento, deslizamiento, vuelco plástico, resistencia estructural de la propia cimentación, movimientos que induzcan daños en la estructura) pero se quiere hacer constar que tal lista de posibles problemas no es completa.

Pueden existir problemas de estabilidad de excavaciones durante ejecución, problemas de achiques o de filtraciones e incluso de erosiones o de ataques químicos a los hormigones.

Pueden existir problemas de asentos por mala calidad en la construcción (falta de limpieza del fondo de las excavaciones, por ejemplo) problemas de mal comportamiento dinámico (cimentación de maquinaria vibrante, o de estructuras sometidas a acciones de viento y oleaje o a acciones sísmicas), problemas de impermeabilización de losas de cimentaciones de sótanos, o de crecimiento de vegetación o arbustos que muevan la cimentación, etc.

Pueden existir problemas de agrietamientos y levantamientos asociados a arcillas expansivas, problemas de disolución cárstica, problemas de erosión de rellenos de arcillas en juntas de la roca de cimentación, posibles excavaciones futuras que descalcen los cimientos en estudio o incluso los efectos sísmicos sobre el propio terreno de cimentación.

Todos estos y otros efectos que puedan pensarse, propios de la geotecnia o de su frontera con otras disciplinas, deben preverse antes de proyectar y construir una cimentación superficial, aunque de cada uno de esos temas no se establezca aquí un apartado específico guiando el correspondiente método de análisis.

3.5.3 Características de la cimentación

3.5.3.1 Configuración geométrica

Para definir la configuración geométrica del subsuelo en el estudio de cimentaciones superficiales se tendrán en cuenta los principios generales indicados en 3.3.5.1.

La cimentación se definirá por sus dimensiones nominales ⁽⁴⁾, tales como anchuras “B”, longitudes “L”, etc.

Las cimentaciones que no tengan formas rectangulares podrán asimilarse a rectángulos equivalentes para aplicar las fórmulas que aquí se indican para cimentaciones rectangulares. Esa equivalencia deberá hacerse conservando las características de más interés según los casos tal como se indicará en cada método de análisis, ya sean el área, la relación de momentos de inercia según ejes ortogonales, etc.

La profundidad de cimentación, D, será una estimación del valor mínimo que razonablemente cabe esperar en cada situación de proyecto en alguno de los lados de la cimentación.

(4) Cuando el efecto pueda ser importante, se restará o añadirá (según sea más desfavorable) al valor de la dimensión geométrica la tolerancia de construcción que figure en los planos de proyecto.

3.5.3.2 Acciones

En la evaluación de las acciones de cálculo a utilizar en el estudio de los distintos Estados Límite Últimos, se tendrán en cuenta las recomendaciones indicadas en 3.3.5.3.

En general los Estados Límite Últimos se deberán analizar en situaciones persistentes y transitorias considerando al menos tres combinaciones fundamentales (o características).

- a. La que produce mayor carga vertical.
- b. La que produce mayor inclinación de la carga.
- c. La que produce mayor excentricidad de la carga.

En situaciones excepcionales deben estudiarse todas aquellas combinaciones que el ingeniero piense que, en su proyecto particular, puedan ser más desfavorables. La situación sísmica debe ser contemplada cuando proceda, según indique la normativa vigente.

En las cargas verticales, y para el estudio de Estados Límite Últimos de hundimiento, deslizamiento y vuelco plástico, se incluirán el peso del cimiento y las subpresiones como acciones. Los posibles excesos de presión intersticial provocados por la aplicación de las cargas dentro de suelos arcillosos impermeables, en general, no se considerarán como parte integrante de esa subpresión de diseño.

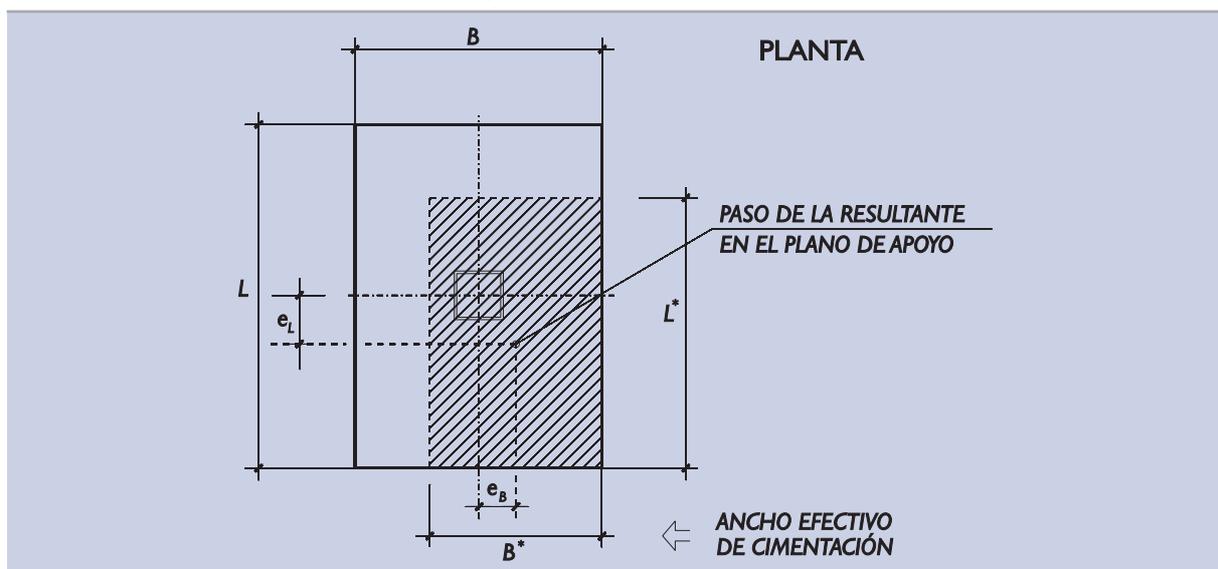
En el análisis de estados límite de hundimiento, y para aquellos casos en que exista excentricidad de la resultante de las acciones respecto al cimiento, se deberán calcular, para cada combinación de acciones, los siguientes parámetros geométricos:

Ancho equivalente, $B^* = B - 2e_B$

Largo equivalente, $L^* = L - 2e_L$

Donde e_B y e_L son las excentricidades según las dos direcciones ortogonales que se indican en la Fig. 3.5.2.

Figura 3.5.2. Geometría de la cimentación equivalente



En las cimentaciones de otra forma, la asimilación a rectángulos debe hacerse conservando algunas características comunes. En la Fig. 3.5.3, se incluye un procedimiento de conversión círculo-rectángulo que se considera recomendable.

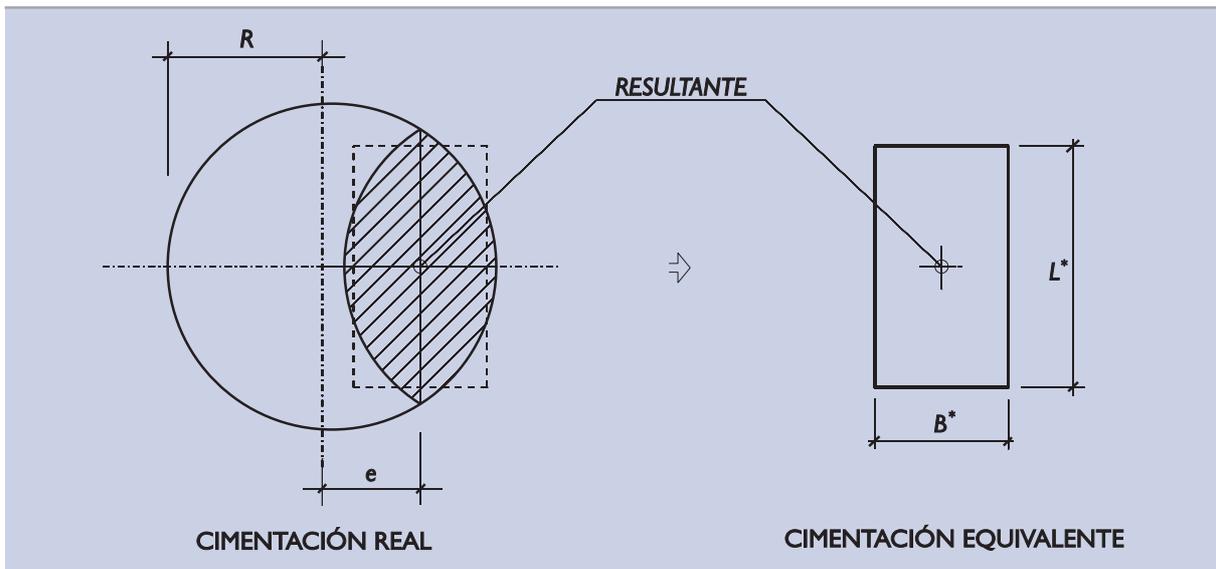
Calculadas esas dimensiones equivalentes se obtendrá, también para cada combinación de acciones, el valor de la presión vertical efectiva media, definida por:

$$p_v = \frac{V}{B^* \cdot L^*}$$

donde

V = fuerza vertical efectiva.

Figura 3.5.3. Cimentación rectangular equivalente a otra circular con carga excéntrica



Excentricidad e/R	Ancho equivalente B*/R	Longitud equivalente L*/R
0	1,73	1,81
0,10	1,55	1,77
0,20	1,37	1,71
0,30	1,19	1,64
0,40	1,02	1,56
0,50	0,84	1,46
0,60	0,67	1,33
0,70	0,50	1,18
0,80	0,33	0,98
0,90	0,17	0,71

Esta ROM admite como procedimiento de comprobación de la seguridad algunos métodos basados en “experiencias contrastadas similares”. A efectos de comparar presiones de cimentación, se define en esta ROM “presión vertical de comparación” $p_{v,comp}$, que se define como el mayor de los tres valores siguientes de p_v :

- El que corresponde a la combinación cuasi permanente.
- El 90% del que correspondería a la combinación fundamental ⁽⁵⁾ que conduzca a mayor valor de p_v .
- El 80% del máximo valor de p_v que corresponda a las combinaciones accidentales.

(5) Para este cálculo particular, los valores de las acciones no se mayorarán ($\gamma_g = \gamma_q = 1$)

Asociados al valor de $p_{v,comp}$ que resulte, deben considerarse los valores de las dimensiones geométricas de la cimentación (D, B^*, L^*) y de la inclinación de la carga correspondiente.

Normalmente el plano de cimentación será horizontal, así se ha supuesto hasta aquí. Si ese plano tuviese una ligera inclinación, el concepto vertical y horizontal pueden cambiarse por normal y tangencial al plano de cimentación y seguir aplicando las reglas que aquí se indican. Inclinaciones superiores al 10% requieren técnicas de análisis específicas fuera del alcance de esta Recomendación.

3.5.3.3 Características del terreno

Para fijar las características del terreno se utilizarán parámetros geotécnicos adecuados según se indica en el apartado 3.3.5.2. Dependiendo del tipo de análisis serán necesarios unos u otros parámetros.

Para el estudio de Estados Límite Últimos en general serán necesarios los parámetros de peso específico y humedad, definidos en 2.2.3 y 2.2.4, así como los de resistencia, definidos en 2.2.8 para los suelos y 2.2.9 para las rocas. Para aquellos problemas que se puedan resolver con métodos basados en la experiencia, que más adelante se indican, la resistencia del terreno puede quedar representada por otros parámetros indirectos tales como:

- ◆ Índice N del ensayo SPT.
- ◆ Resistencia en ensayos penetrométricos continuos (estáticos o dinámicos).
- ◆ Presión límite en ensayos presiométricos.

Incluso en algunos casos claros, donde la experiencia previa es abundante, puede ser suficiente un contraste de las propiedades elementales del terreno para evaluar la seguridad frente a Estados Límite Últimos.

En esos casos los parámetros de peso específico y humedad, así como otras propiedades índice elementales que avalen la similitud con los casos en los que existe experiencia, no podrán omitirse.

Para el estudio de los Estados Límite de Servicio pueden ser necesarios, además, los parámetros de deformación del terreno definidos en 2.2.10, así como otros específicos, según los casos, como se indica en 2.2.11.

En situaciones de poco riesgo y en los casos en que exista experiencia abundante, la comprobación de los Estados Límite de Servicio puede no requerir más información del terreno aparte de las propiedades índice básicas necesarias para asegurar la similitud del caso considerado y los casos sobre los que se tiene experiencia.

3.5.4 Verificación de la seguridad frente al hundimiento

3.5.4.1 Métodos de verificación

El hundimiento de una cimentación es un modo de fallo principal que siempre ha de considerarse. Las formas de verificar que una cimentación superficial es segura son muy variadas. El ingeniero ha de elegir, de entre ellas, la que resulte más adecuada a su caso. Esa elección debe estar guiada por varios criterios; los más importantes son el tipo de terreno y la importancia de la obra.

A efectos de elegir el procedimiento de verificación más adecuado, se distinguen tres tipos generales de terreno.

- a. Terrenos granulares. Son aquéllos formados esencialmente por arenas y gravas aunque tengan proporciones de suelos finos (arcillas y limos), pero en proporciones siempre inferiores al 15% y cuya permeabilidad, además, sea superior a 10^{-4} cm/s.
- b. Terrenos cohesivos. Son aquéllos cuyo comportamiento mecánico queda principalmente condicionado por la presencia de suelos finos (arcillas y limos). Exhiben una resistencia a compresión simple apreciable pero inferior a 1 MPa y son bastante impermeables; su permeabilidad es inferior a 10^{-4} cm/s.

- c. Terrenos cohesivos firmes y rocas. Son aquéllos cuya resistencia a compresión simple supera normalmente el valor umbral $q_u = 1$ MPa.

Pueden existir terrenos complejos que no puedan catalogarse bien dentro de alguno de estos tres grupos. En esa situación el ingeniero debe proceder a clasificarlo de acuerdo con más de uno de ellos, seguir los procedimientos indicados según esa clasificación y, finalmente, una vez alcanzado el resultado final elegir, de las dos alternativas utilizadas, la que conduzca a un resultado más conservador.

Los procedimientos de verificación que se indican a continuación y su posible aplicabilidad quedan resumidos en la Tabla 3.5.1.

Tabla 3.5.1. Métodos de verificación de la seguridad frente al hundimiento

Nombre del método	Tipo de terreno	Categoría de la obra ⁽⁶⁾
Experiencia local contrastada	Suelos firmes y rocas	C
Método basado en el SPT	Suelos granulares	B y C
Método basado en ensayos presiométricos	Cualquiera	B y C
Método basado en ensayos de penetración estática	Cualquiera excepto roca	B y C
Método basado en otros ensayos de campo	Cualquiera	C
Carga de hundimiento en suelos firmes y rocas	Suelos firmes y rocas	A, B y C
Cálculo analítico de la carga de hundimiento	Cualquiera	A, B y C

Nota: En casos especiales, el método de verificación puede incluir la realización de ensayos de carga «in situ» debidamente instrumentados.

3.5.4.2 Verificación según la experiencia local contrastada

La experiencia local, obtenida mediante la observación del comportamiento adecuado de cimentaciones semejantes a la del caso en estudio y sobre terrenos similares, puede ser suficiente para justificar las dimensiones de una cimentación.

En estos casos debe procederse a definir, como resumen de la experiencia previa, la profundidad de cimentación adecuada y las presiones de servicio que se consideran válidas para distintos anchos de cimentación.

Por otro lado, se calculará la presión vertical representativa (o presión de comparación) que transmite el elemento de cimentación al terreno considerando las combinaciones de acciones mencionadas en 3.5.3.2.

Finalmente, será necesario reconocer el terreno para conocer, como mínimo, la estructura del terreno, la ubicación del nivel freático y los parámetros de estado (peso específico seco y humedad).

Una cimentación superficial queda verificada frente al hundimiento cuando su presión de servicio no supera la avalada por la experiencia, para condiciones de cimentación y dimensiones similares a las del caso en estudio.

3.5.4.3 Verificación en función de los ensayos SPT

De entre las varias correlaciones existentes entre el índice N del ensayo estándar de penetración SPT y la presión vertical de comparación se describe, a continuación, una cuyo formato se asemeja con la inicialmente propuesta por Meyerhof ⁽⁷⁾ (1956).

(6) La categoría de la obra se define en 2.12.

(7) «Penetration Tests and Bearing Capacity of Cohesionless Soils». Journal of Soil Mechanics and Foundation. Eng. ASCE.

La presión vertical admisible en arenas, de manera que se tenga una seguridad adecuada frente al hundimiento y de manera que, además, el asiento máximo sea inferior a una pulgada (2,54 cm), es:

$$p_{v_{adm}} = 6N \left(1 + \frac{D}{3B^*} \right) \text{ kPa} \quad \text{para } B \leq 1,3 \text{ m}$$

ó

$$p_{v_{adm}} = 4N \left(1 + \frac{D}{3B^*} \right) \left(1 + \frac{0,3\text{m}}{B^*} \right)^2 \text{ kPa} \quad \text{para } B \geq 1,3 \text{ m}$$

donde

D = profundidad de cimentación definida en 3.5.3.1.

B* = ancho equivalente de la cimentación definido en 3.5.3.2.

El valor de N que debe usarse es el correspondiente a una eficacia de hincas del orden del 60%, que es la más frecuente en los ensayos bien realizados en el pasado. Si se tiene control sobre este aspecto pueden realizarse las correcciones correspondientes.

El índice N del SPT a utilizar en esta expresión debe ser el valor medio obtenido en la zona comprendida entre el plano de cimentación y una profundidad $1,5B^*$ bajo dicho plano.

Como quiera que los valores del índice N del SPT dependen de la sobrecarga efectiva de tierras al nivel del ensayo, tales valores deben referirse a una presión normalizada de 100 kPa. Los factores de corrección a utilizar se indican en la Tabla 3.5.2.

Tabla 3.5.2. Factor de corrección del índice «N» del SPT por la sobrecarga efectiva de las tierras. $N(\text{corregido}) = f \cdot N$

Presión vertical efectiva al nivel del ensayo (kPa)	Factor de corrección, f
0	2
25	1,5
50	1,2
100	1
200	0,8
≥ 400	0,5

Para valores intermedios se puede interpolar linealmente entre los datos indicados.

En cualquier caso, el valor del índice N del SPT que se utilice en las expresiones anteriores, después de corregido, no debe ser nunca superior a 50.

La profundidad de cimentación “D” a utilizar en los cálculos no debe nunca ser mayor que el ancho equivalente de cimentación B*.

Las fórmulas anteriores se consideran aplicables para cimentaciones superficiales de hasta unos 5 m de anchura, como máximo.

Las expresiones anteriores son válidas para acciones fundamentalmente verticales; si existen cargas horizontales que inclinen la resultante más del 10%, este procedimiento no debe utilizarse.

Las expresiones anteriores están pensadas para situaciones en las que el nivel freático está próximo o por encima del plano de cimentación y en reposo o con gradientes pequeños.

Si, por algún motivo, existiera un flujo de agua ascendente en el entorno de las cimentaciones superficiales con gradiente l_v , los valores de la presión vertical admisible se multiplicarán por el factor de reducción:

$$p_{vadm} \text{ (corregida por el flujo ascendente)} = \beta \cdot p_{vadm}$$

$$\beta = 1 - l_v \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma'}$$

donde

- γ' = peso específico sumergido del suelo.
 γ_w = peso específico del agua.

Si, al contrario, se prevé, en la situación de proyecto correspondiente, que el nivel freático estará siempre más profundo que el plano de cimentación, entonces la presión admisible podrá corregirse de acuerdo con la expresión siguiente:

$$p_{vadm} \text{ (corregida por la prof. N.F.)} = \lambda \cdot p_{vadm}$$

$$\lambda = 1 + 0,6 \left(\frac{h}{B^*} \right) \leq 2$$

donde

- h = profundidad del nivel freático bajo el plano de cimentación.

La comprobación de que no se producen asientos excesivos debidos a la presencia de suelos menos firmes situados a mayor profundidad es, en todo caso, necesaria.

Una cimentación superficial puede darse por comprobada cuando la presión de comparación que se define en 3.5.3.2 es menor o igual que el valor de p_{vadm} que se indica en este apartado.

3.5.4.4 Verificación mediante ensayos presiométricos

Los ensayos presiométricos realizados en el terreno próximo a la cimentación en estudio permiten conocer un parámetro esencial con el que se puede estimar la carga de hundimiento p_{vh} de las cimentaciones superficiales: es la presión límite p_l resultante de la correcta interpretación del ensayo.

Para poder aplicar este método es necesario conocer, además de la presión límite, la ubicación del nivel freático, la naturaleza del terreno de apoyo y su peso específico. También es necesario conocer la profundidad a la que piensa establecerse la cimentación y sus dimensiones. La carga de hundimiento puede estimarse mediante la expresión siguiente:

$$p_{vh} = p_o + K \cdot \Delta p \cdot f_\delta \cdot f_D$$

donde:

- p_{vh} = presión vertical efectiva que produce el hundimiento.
 p_o = presión efectiva al nivel del plano de apoyo.
 K = coeficiente adimensional.
 $K = 0,8$ para suelos cohesivos ⁽⁸⁾.
 $K = 1,0$ para terrenos granulares y rocas blandas ⁽⁸⁾.
 Δp = presión límite neta, una vez descontado, al valor de la presión límite bruta, la posible presión intersticial y la presión efectiva horizontal que existieran al nivel del ensayo. Se utilizará el valor medio correspondiente al tramo de profundidad B^* bajo el plano de apoyo.

(8) La definición de tipos de terreno puede verse en 3.5.4.1.

f_{δ} = factor de corrección por el efecto de la inclinación de la carga. Debe tomarse el valor siguiente:

$$f_{\delta} = (1,1 - \text{tg } \delta)^3 \leq 1$$

f_D = factor de corrección por efecto del empotramiento de la cimentación. Su determinación debe realizarse de acuerdo con lo indicado a continuación.

$$f_D = 1 + \left(a + \frac{\Delta p}{b} \right) \cdot \eta \frac{D}{B^*} \left(0,6 + 0,4 \frac{B^*}{L^*} \right)$$

donde

a = parámetro adimensional, que debe tomarse:

a = 0,2 suelos cohesivos

a = 0,3 suelos granulares

a = 0,25 rocas blandas

Δp = presión límite neta, definida anteriormente en este mismo apartado.

b = presión de referencia. Debe tomarse:

b = 10 MPa suelos cohesivos y rocas blandas

b = 5 MPa suelos granulares

η = factor adimensional que mide la relación que existe entre los valores de la presión límite neta en la zona situada por encima del plano de apoyo, espesor D, y el valor de Δp , que se utiliza para representar la resistencia del terreno bajo el plano de apoyo.

Las dimensiones D, B^* y L^* se definen en 3.5.3.1 y 3.5.3.2. En todo caso se mantendrá como profundidad de cálculo un valor inferior al ancho; $D \leq B^*$.

Para verificar la seguridad de una cimentación superficial frente al hundimiento por medio de este método, se exigirán los coeficientes de seguridad establecidos en el apartado 3.5.4.9.

3.5.4.5 Método basado en ensayos de penetración estática

Los ensayos de penetración estática suelen realizarse en suelos blandos donde no es frecuente realizar cimentaciones superficiales. A pesar de ello, en algunas circunstancias (pequeñas cargas, estructuras poco sensibles a los asentamientos, etc.) puede ser necesario estimar la carga de hundimiento de cimentaciones superficiales utilizando los resultados de este ensayo ⁽⁹⁾. La relación que permite evaluar la presión vertical efectiva de hundimiento es la siguiente:

$$p_{vh} = p_0 + q_c \left\{ K_1 + K_2 \frac{D}{B^*} \eta \left(0,6 + 0,4 \frac{B^*}{L^*} \right) \right\} f_{\delta}$$

donde

p_{vh} = presión vertical efectiva de hundimiento.

p_0 = presión vertical efectiva en el entorno de la cimentación y al nivel del plano de apoyo.

q_c = valor medio de la resistencia a la penetración en la zona de espesor B^* bajo el plano de apoyo.

K_1 = coeficiente adimensional, que debe tomarse:

$K_1 = 0,32$ para suelos cohesivos

$K_1 = 0,17$ para rocas blandas

$$K_1 = \left(7 + \frac{q_c (\text{MPa})}{3 \text{MPa}} \right)^{-1} \text{ para arenas}$$

(9) También, en algunas circunstancias, este ensayo puede realizarse en suelos de consistencia firme aunque su penetración sea limitada.

- K_2 = parámetro adimensional. Deben utilizarse los valores siguientes:
 $K_2 = 0,10$ para suelos cohesivos ; $K_2 = 0,05$ para suelos granulares y rocas
- η = relación que existe entre el valor medio de la resistencia a la penetración estática en la zona de terreno situada por encima del plano de apoyo y el valor de q_c que se utiliza para representar la resistencia a la penetración bajo el plano de cimentación.

Los significados de f_δ y de las dimensiones D, B^* y L^* se indican en 3.5.4.4. La profundidad D que se utilice en los cálculos quedará limitada al ancho B^* ; $D \leq B^*$.

Para verificar la seguridad de una cimentación superficial frente a hundimiento por medio de este método se exigirán los coeficientes de seguridad establecidos en el apartado 3.5.4.9.

3.5.4.6 Métodos basados en otros ensayos de campo

Entre los ensayos de campo más habituales que pueden permitir la verificación de la seguridad frente al hundimiento deben citarse los ensayos penetrométricos dinámicos. En la Parte 2 de esta ROM se describen estos ensayos.

No existen procedimientos directos que correlacionen la presión de hundimiento de una cimentación superficial y el resultado de este tipo de reconocimiento. La obtención de la carga de hundimiento partiendo de estos ensayos ha de hacerse de manera indirecta, traduciendo los resultados de este tipo de ensayo a otro (presión límite, resistencia a la penetración estática, índice N del ensayo SPT, etc.).

Las correlaciones locales que existen entre los ensayos de penetración dinámica y los ensayos hasta aquí mencionados pueden permitir la estimación de la carga de hundimiento en algunas circunstancias. Se advierte, sin embargo, que, al acumularse las imprecisiones de los datos de campo con los de las posibles correlaciones, se debe ser muy conservador al utilizarlas; los coeficientes de seguridad que se adopten deben ser acordes con las imprecisiones de los procedimientos de análisis.

Aunque el procedimiento de ensayo directo en campo de la carga de hundimiento es poco frecuente, debe mencionarse aquí, pues resulta ser el más preciso, particularmente cuando las dimensiones del modelo de campo se aproximan a las de la cimentación real en estudio. En ocasiones puede ser de interés realizarlos.

3.5.4.7 Carga de hundimiento en suelos cohesivos firmes y rocas

Las cargas de hundimiento de una cimentación superficial apoyada en suelos cohesivos firmes o rocas puede estimarse según el procedimiento simplificado que se describe en este apartado.

Los datos necesarios para evaluar la carga de hundimiento son los siguientes:

- ◆ Datos geométricos de la cimentación. Son las longitudes D, B, L, B^*, L^* definidas en 3.5.3.1 y 3.5.3.2, e inclinación de la carga sobre la cimentación (ángulo δ).
- ◆ Estructura general de la formación rocosa. Interesa conocer especialmente la roca ubicada en el entorno próximo a la cimentación, dentro de una zona de amplitud $4B \times 4L$ en planta y de amplitud $2B$ en profundidad bajo el plano de apoyo.
- ◆ Las características de la roca que deben utilizarse en los cálculos serán las de la roca de peores condiciones que aparezca en ese entorno. Para hacer alguna otra hipótesis simplificativa en este sentido, es necesario realizar una justificación específica.
- ◆ Resistencia a compresión simple de la roca. Este dato puede determinarse mediante ensayos específicos (ensayos de compresión simple en probetas de roca debidamente talladas a partir de testigos de roca sana) o mediante técnicas indirectas (ensayo de puntas) debidamente interpretados.

- ◆ Grado de alteración de la roca, según se define en 2.2.9.7. Se debe tomar el que corresponda a la superficie de apoyo siempre que, como es usual, la alteración no sea mayor a mayor profundidad.
- ◆ Distancia entre litoclasas. Se tomará el valor correspondiente a la familia de litoclasas que aparezca con menor espaciamiento en la zona próxima al apoyo.
- ◆ El valor medio del RQD en la zona de profundidad B, bajo el plano de apoyo, y de dimensiones B × L en planta.

Cuando el grado de alteración sea igual o superior a IV o cuando el espaciamiento entre litoclasas sea menor que 10 cm o cuando el RQD sea inferior al 10%, este procedimiento no debe utilizarse; el terreno habrá que considerarlo como un suelo y utilizar otro procedimiento de cálculo.

La presión vertical efectiva de hundimiento de cimentaciones sobre formaciones rocosas puede estimarse como sigue:

$$p_{vh} = 3 (p_r \cdot q_u)^{1/2} \cdot f_D \cdot f_A \cdot f_\delta < 15 \text{ MPa}$$

donde:

p_{vh} = presión vertical efectiva que produce el hundimiento.

p_r = 1 MPa, presión de referencia.

q_u = resistencia a compresión simple de la roca sana.

f_D = factor de reducción debido al diaclasamiento. Será el mínimo de los dos siguientes:

$$f_D = 2 \cdot \left(\frac{s}{B^*} \right)^{1/2} \leq 1 \quad ; \quad f_D = 0,2 \cdot \left(\frac{B_o \times RQD(\%)}{B^*} \right)^{1/2} < 1$$

s = espaciamiento entre litoclasas. Ver texto. No se utilizará este procedimiento cuando $s < 0,10$ m.

B^* = ancho equivalente de la cimentación.

B_o = ancho de referencia, se tomará $B_o = 1$ m.

RQD = índice de fragmentación de la roca. Ver 2.7.1.

f_A = factor de reducción debido al grado de alteración de la roca. Se tomará el valor siguiente:

Grado de meteorización (ver 2.2.9.7)	Factor f_A
I	I
II	0,7
III	0,5

f_δ = factor que tiene en cuenta la inclinación de la carga. Se tomará:

$$f_\delta = (1,1 - \text{tg } \delta)^3 < 1$$

Este procedimiento de cálculo no es adecuado cuando se dan alguna de las circunstancias indicadas anteriormente en este apartado o alguna otra de las siguientes:

- ◆ La cimentación está en terreno inclinado más del 10% en la zona del entorno del apoyo.
- ◆ La cimentación se establece cerca de un talud. En ese caso la comprobación de las condiciones de estabilidad global habrá de realizarse por otro procedimiento.
- ◆ Para grandes áreas de apoyos ($> 100 \text{ m}^2$) el problema de hundimiento puede quedar controlado por accidentes singulares (fallas, diaclasas excepcionales, etc.) cuyo efecto debe investigarse.

La carga de hundimiento de una cimentación apoyada en roca depende teóricamente de la naturaleza de la roca. A igualdad de resistencia a compresión simple y del resto de parámetros (diaclasamiento, alteración y tamaño del área de apoyo), existen tipos de roca que podrían soportar mayores cargas que otros. El efecto del tipo de roca no está aún bien establecido en la práctica habitual y por ese motivo no se indica, en esta ROM, un procedimiento explícito para considerarlo.

La verificación de otros estados límite distintos del hundimiento (estabilidad global, deslizamiento, vuelco, etc.) no queda garantizada con esta verificación de la presión de hundimiento, por lo que serán necesarias otras comprobaciones complementarias.

Para verificar la seguridad de una cimentación superficial frente al hundimiento por medio de este método se exigirán los coeficientes de seguridad establecidos en el apartado 3.5.4.9.

3.5.4.8 Cálculo analítico de la carga de hundimiento

3.5.4.8.1 FÓRMULA POLINÓMICA

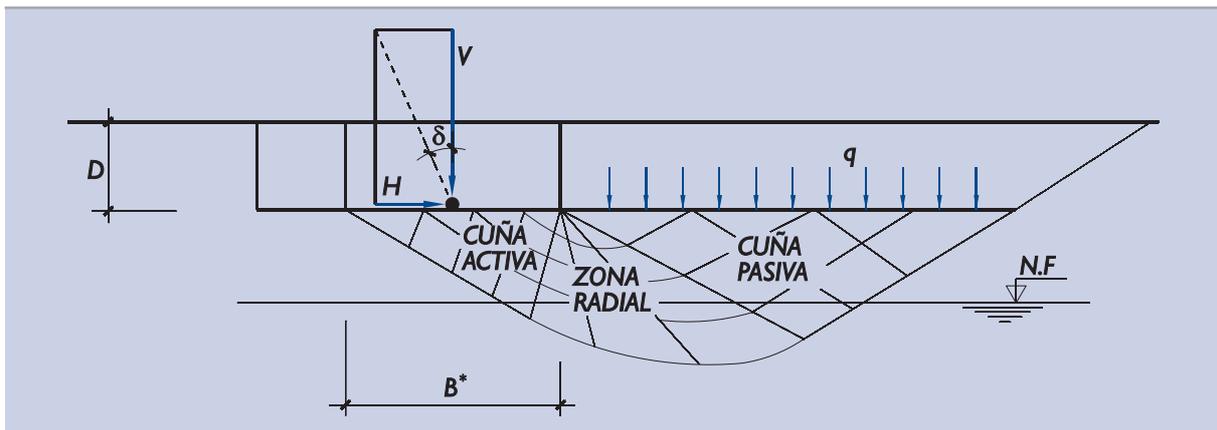
La fórmula más frecuente para verificar la seguridad frente al hundimiento de las cimentaciones superficiales, y cuya aplicación se recomienda, es la conocida bajo el nombre de Brinch Hansen, aunque de ella existen distintas versiones que difieren en algunos detalles sobre el procedimiento de obtención de algunos parámetros. En la Fig. 3.5.4 se muestra un esquema del problema estudiado indicando la superficie de rotura adoptada. Según la versión que se recomienda en esta ROM la componente vertical de la presión que produce el hundimiento es:

$$p_{vh} = q \cdot N_q \cdot f_q + c \cdot N_c \cdot f_c + \frac{1}{2} \gamma \cdot B^* \cdot N_\gamma \cdot f_\gamma$$

donde:

- q = sobrecarga debida al peso de tierras a la profundidad de la cimentación, en el entorno del cimientado.
- c = cohesión.
- γ = peso específico del suelo. El valor de cálculo se indica más adelante.
- N_q, N_c, N_γ = coeficientes de capacidad de carga.
- f_q, f_c, f_γ = factores de corrección.

Figura 3.5.4. Geometría del posible hundimiento



Los factores de corrección son función, entre otras variables, del ángulo de rozamiento. Su obtención se realizará tal como se indica en 3.5.4.8.2.

Los coeficientes de capacidad de carga son función exclusiva del ángulo de rozamiento del terreno y pueden obtenerse mediante las expresiones analíticas siguientes:

$$N_q = \frac{1 + \operatorname{sen} \phi}{1 - \operatorname{sen} \phi} \cdot e^{\pi \operatorname{tg} \phi}$$

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\operatorname{tg} \phi} \quad (\text{para } \phi = 0 \text{ resulta } N_c = \pi + 2)$$

$$N_\gamma = 2(N_q - 1) \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (\text{Base rugosa})$$

Para facilitar el cálculo, en la Tabla 3.5.3 se incluyen los valores de los coeficientes de capacidad de carga que se obtienen para valores de varios ángulos de rozamiento indicados.

Para valores de $\phi > 45^\circ$ el coeficiente de capacidad de carga N_γ puede resultar excesivamente optimista. Para tener esto, en cuenta puede utilizarse como valor de cálculo un ángulo de rozamiento que excede en 45° únicamente la mitad del exceso real. Esto es:

$$\phi_{\text{cálculo}} = \frac{1}{2}(\phi_{\text{real}} + 45^\circ), \quad \text{cuando } \phi_{\text{real}} > 45^\circ$$

El valor de N_γ que se indica es adecuado para el estudio de cimentaciones estructurales con base rugosa. En los casos excepcionales de apoyos con “base lisa” (interposición de láminas o superficies de poco rozamiento), el valor de N_γ que debe utilizarse debe ser la mitad del indicado.

En suelos arcillosos blandos y siempre que se tema que en el cimiento puedan generarse presiones intersticiales fuertes y que no se atenúen durante el proceso de carga, será necesario considerar la condición “sin drenaje”.

Tabla 3.5.3. Coeficientes de capacidad de carga de la fórmula de Brinch Hansen

ϕ (grados)	N_q	N_c	N_γ
20	6,4	14,8	3,9
21	7,1	15,8	4,7
22	7,8	16,9	5,5
23	8,7	18,1	6,5
24	9,6	19,3	7,7
25	10,7	20,7	9,0
26	11,8	22,3	10,6
27	13,2	23,9	12,4
28	14,7	25,8	14,6
29	16,4	27,9	17,1
30	18,4	30,1	20,1
31	20,6	32,7	23,6
32	23,2	35,5	27,7
33	26,1	38,6	32,6
34	29,4	42,2	38,4
35	33,3	46,1	45,2
36	37,8	50,6	53,4
37	42,9	55,6	63,2
38	48,9	61,4	74,9
39	56,0	67,9	89,0
40	64,2	75,3	106,1
41	73,9	83,9	126,7
42	85,4	93,7	152,0
43	99,0	105,1	182,8
44	115,3	118,4	220,8
45	134,9	133,9	267,8

A continuación se hacen ciertas indicaciones sobre la forma de caracterizar el peso y la resistencia del terreno en ambos tipos de cálculo.

a. Hundimiento sin drenaje

Los cálculos de la presión vertical que produce el hundimiento de una cimentación sobre un terreno poco permeable deben realizarse en la hipótesis de que no se produzca ninguna consolidación del terreno.

El concepto “poco permeable” se refiere a la capacidad de disipación de las presiones intersticiales generadas por la aplicación de la carga precisamente mientras se va aplicando. El caso teórico de rotura sin drenaje será tanto más próximo al real cuanto más impermeable sea el suelo y cuanto más rápida sea la aplicación de la carga.

En términos generales, el caso de no drenaje teórico, que es ciertamente un caso extremo, se supone como posible cuando se den las condiciones que se indican en el apartado 2.2.7, salvo que en proyecto se tomen precauciones específicas para permitir y comprobar cierta consolidación (o disipación de presiones intersticiales) durante la construcción.

En la situación extrema “sin drenaje”, la resistencia del terreno puede simularse con un ángulo de rozamiento nulo y una cohesión igual a la resistencia al corte obtenida mediante ensayos de corte sin drenaje, ya sea de campo (vane test, por ejemplo), bien sean de laboratorio (ensayos triaxiales UU, por ejemplo), bien sean mediante estimación indirecta a través de correlaciones (penetrómetro estático, por ejemplo) u otros ensayos indicados en la Parte 2 de esta ROM.

Los parámetros resistentes a utilizar en la fórmula polinómica serán, por lo tanto:

$$\begin{aligned}\phi &= 0 \\ c &= s_u\end{aligned}$$

donde:

s_u = resistencia al corte sin drenaje media de la zona de profundidad B^* bajo el plano de cimentación.

El parámetro “q” de la fórmula polinómica se calculará con la expresión:

$$q = \gamma_{ap} D$$

donde:

γ_{ap} = peso específico aparente del terreno en la zona comprendida entre la superficie del terreno y el plano de cimentación.

D = profundidad de cimentación, definida en 3.5.3.1

Cuando el terreno de cimentación esté totalmente sumergido se utilizará el peso específico sumergido, en lugar del valor aparente, para evaluar la sobrecarga “q”.

b. Hundimiento con drenaje

La verificación de la seguridad frente al hundimiento con drenaje debe hacerse siempre, ya que esta situación trata de representar el comportamiento de cimentaciones superficiales en suelos arenosos secos o saturados y cimentaciones en cualquier otro tipo de terreno una vez sobrepasado el proceso de adaptación del cimienta a las cargas impuestas.

Los datos que interesan deben representar el comportamiento medio esperado del terreno a lo largo de la línea de rotura. Los datos de resistencia serán el ángulo de rozamiento y la cohesión efectivas, que pueden proceder de ensayos de laboratorio realizados con muestras inalteradas:

- ◆ Ensayos triaxiales realizados con consolidación previa y rotura sin drenaje (CU), midiendo y descontando las presiones intersticiales.
- ◆ Ensayos triaxiales realizados con consolidación previa y rotura con drenaje (CD).

También pueden proceder de otros ensayos de laboratorio (corte directo, corte simple) o de correlaciones previamente establecidas con ensayos de campo (ensayos de penetración, ensayos de placa de carga, etc.).

La sobrecarga “q” a utilizar en el primer término de la fórmula polinómica debe ser igual a la presión efectiva al nivel del plano de cimentación alrededor de la cimentación. Si ese valor resultase variable se utilizará el valor medio a lo largo del lado que menor sobrecarga tuviera.

El peso específico de cálculo del tercer término de la fórmula polinómica debe ser:

- ◆ El peso específico aparente, γ_{ap} , si el nivel freático está a una profundidad mayor que $1,5B^*$ bajo el plano de cimentación.
- ◆ El peso específico sumergido, γ' , si el nivel freático está situado en o por encima del plano de cimentación.
- ◆ Un peso específico intermedio, interpolable linealmente, si el nivel freático está comprendido entre los dos casos anteriores.

Si existiera un flujo de agua ascendente, de gradiente I_v , que afectara al plano de cimentación, el peso específico de cálculo del tercer término que se viene considerando sería:

$$\gamma_{\text{cálculo}} = \gamma' - I_v \cdot \gamma_w$$

donde:

γ' = peso específico sumergido del terreno.

γ_w = peso específico del agua.

I_v = gradiente vertical medio en la zona de espesor $1,5B^*$ bajo el plano de cimentación.

La fórmula polinómica aplicada en condiciones drenadas es especialmente inadecuada en casos en que el terreno no es horizontal. Las cimentaciones superficiales en las proximidades de taludes pueden sufrir hundimiento con cargas mucho menores. En esos casos la verificación de la seguridad frente al hundimiento debe hacerse con los métodos de cálculo indicados en 3.8.

3.5.4.8.2 FACTORES DE CORRECCIÓN

Cada uno de los tres términos de la forma polinómica debe ser afectado por un coeficiente de corrección, f, cuyo subíndice indicará el término al que corresponde.

A su vez, cada uno de los tres coeficientes de corrección se debe obtener como producto de diversos coeficientes que tienen en cuenta cada uno de los efectos parciales que intervienen en el problema.

A continuación se consideran los efectos siguientes:

Efecto	Coefficiente
Forma de la cimentación	s
Inclinación de la carga	i
Resistencia del terreno ubicado sobre el plano de apoyo	d
Inclinación del plano de apoyo	r
Pendiente del terreno en el entorno de la cimentación	t

De esta manera cualquiera de los tres coeficientes de corrección será, a su vez, el producto de 5 coeficientes:

$$f = s \cdot i \cdot d \cdot r \cdot t$$

La manera de obtener cada uno de ellos se indica en lo que sigue:

a. Coeficientes de forma

Los coeficientes de forma tienen en cuenta las proporciones de las dimensiones en planta de la cimentación equivalente. Esas dimensiones son las longitudes B^* y L^* que se definen, para cada combinación de acciones, en el apartado 3.5.3.2. Las fórmulas que deben utilizarse para obtener estos coeficientes son las siguientes:

$$s_q = 1 + \frac{B^*}{L^*} \cdot \frac{N_q}{N_c}$$

$$s_c = s_q$$

$$s_\gamma = 1 - 0,4 \frac{B^*}{L^*}$$

b. Coeficientes de inclinación

Los coeficientes de inclinación tienen en cuenta la desviación de la dirección de la acción resultante sobre el plano de apoyo respecto a la dirección vertical. Esa inclinación se representa por el valor absoluto del ángulo que forman entre si ambas direcciones (Ver Fig. 3.5.4).

Para problemas bidimensionales (cimentaciones superficiales en longitud infinita) los valores de los coeficientes de inclinación se calcularán mediante las expresiones siguientes:

$$i_q = (1 - 0,7 \operatorname{tg} \delta)^3$$

$$i_u = \frac{i_q N_q - 1}{N_q - 1} \geq 0 ; \text{ para } \phi = 0, i_c = 0,5 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{B^* \cdot L^* \cdot c}} \right)$$

$$i_\gamma = (1 - \operatorname{tg} \delta)^3$$

δ = ángulo de desviación de la carga respecto a la vertical.

Cuando se pueda asegurar cierta cohesión "c" en el contacto de la cimentación con el terreno se podrá tomar un ángulo " δ^* " menor, dado por la expresión:

$$\operatorname{tg} \delta^* = \frac{\operatorname{tg} \delta}{1 + \frac{B^* \cdot L^* \cdot c}{V \operatorname{tg} \phi}}$$

En estas expresiones:

V = resultante vertical de las acciones sobre el cimientto.

H = resultante horizontal de las acciones sobre el cimientto.

Cuando el problema sea tridimensional (dimensiones finitas de la cimentación) el hundimiento se debe analizar como problema plano en la dirección más desfavorable. La inclinación de la acción en la otra dirección (δ_T) puede tenerse en cuenta reduciendo cada uno de los tres coeficientes de la forma siguiente:

$$i (\text{tridimensional}) = (1 - \operatorname{tg} \delta_T) \times i (\text{bidimensional})$$

c. Efecto de la resistencia del terreno sobre el plano de cimentación

En las fórmulas anteriores se ha supuesto que el terreno situado por encima del plano de cimentación actúa exclusivamente como una sobrecarga.

En aquellas ocasiones en las que se pueda garantizar que ese terreno estará permanentemente íntegro en una zona amplia del entorno de la cimentación, sin grietas naturales o artificiales (zanjas, dragados locales, etc.), se puede aumentar la carga de hundimiento multiplicando cada uno de los tres términos de la fórmula polinómica por los siguientes coeficientes:

$$d_q = 1 + 2 \operatorname{tg} \phi (1 - \operatorname{sen} \phi)^2 \operatorname{arctg} \frac{D}{B^*}$$

$$d_c = 1 + 2 \frac{N_q}{N_c} (1 - \operatorname{sen} \phi)^2 \operatorname{arctg} \frac{D}{B^*}$$

$$d_\gamma = 1$$

El arco que se menciona en estas fórmulas se expresará en radianes.

d. Efecto de la inclinación del plano de cimentación

Las fórmulas anteriores suponen que el plano de cimentación es horizontal. Si el plano de cimentación está ligeramente inclinado, la carga de hundimiento será algo menor y puede considerarse su efecto haciendo dos modificaciones a la fórmula polinómica.

Por un lado, cada término de la fórmula polinómica debe multiplicarse por los siguientes factores reductores:

$$r_q = e^{-2\eta \operatorname{tanh} \phi}$$

$$r_c = 1 - 0,4 \eta$$

$$r_\gamma = r_q$$

donde “ η ” es el ángulo de desviación del plano de cimentación respecto a la horizontal, medido en radianes.

Por otro lado, el ángulo “ δ ”, definido en las fórmulas polinómicas como desviación respecto a la vertical de la acción sobre el cimientto, debe interpretarse en este caso como desviación respecto a la normal al plano de cimentación. Para tener esto en cuenta será suficiente sumar al ángulo “ δ ” el ángulo “ η ” antes de calcular los coeficientes de inclinación.

Esta forma aproximada de considerar el efecto de la inclinación no debe utilizarse para inclinaciones del cimientto superiores al 10%, los errores podrían ser importantes.

e. Cimentaciones en zonas de pendiente

Las fórmulas anteriores están pensadas para situaciones de terreno plano horizontal en la zona pasiva (ver Fig. 3.5.4).

Si en esa zona el terreno está en pendiente descendente la sobrecarga “ q ” que ha de considerarse en los cálculos es de difícil estimación. A efectos del cálculo simplificado que se describe aquí, se puede suponer como plano de referencia donde actuaría la sobrecarga de cálculo el MN que se indica en la Fig. 3.5.5.

Este plano pasa por el pie delantero de la cimentación, punto N, y corta a la superficie libre del terreno en el punto M, que dista del anterior la longitud “ L ” indicada en la figura.

La sobrecarga equivalente “q” que actúa sobre ese plano se calcula de manera que, actuando normalmente (en la dirección de la normal) sobre MN, resulte una fuerza normal igual al 60% de la resultante de los pesos efectivos del terreno situados sobre esa línea. Ver Fig. 3.5.5.

Se advierte que en algunas cimentaciones de banquetas estrechas el valor de “q” puede resultar negativo.

Después de estimar la sobrecarga de cálculo adecuada, se puede utilizar la fórmula polinómica afectando a sus distintos términos con los siguientes coeficientes reductores:

$$\begin{aligned}t_q &= t_\gamma = (1 - 0,5 \operatorname{tg} \Psi)^5 \\t_c &= 1 - 0,4 \Psi\end{aligned}$$

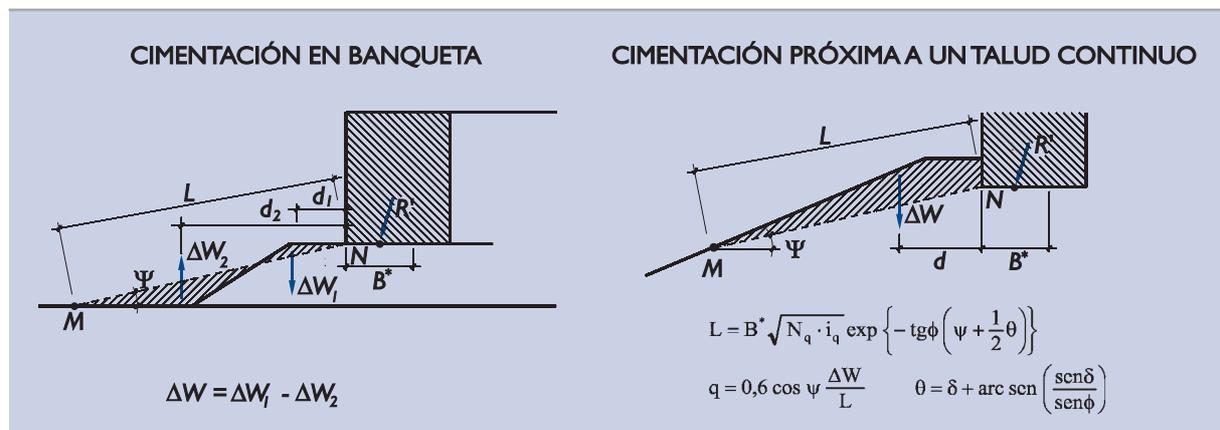
donde Ψ es el ángulo de inclinación del plano MN respecto a la horizontal, expresado en radianes.

Este método aproximado puede resultar tanto más erróneo cuanto mayor sea el ángulo Ψ . En los casos en que este efecto sea decisivo en el proyecto, deben utilizarse procedimientos más complejos, consultando la literatura técnica.

3.5.4.8.3 CIMENTACIONES SUPERFICIALES SOBRE TERRENO HETEROGÉNEO

En las cimentaciones superficiales de las obras marítimas y portuarias se presenta con relativa frecuencia una situación similar a la indicada en la Fig. 3.5.6. La cimentación apoya directamente sobre un material competente que, a su vez, apoya sobre un suelo de menor resistencia.

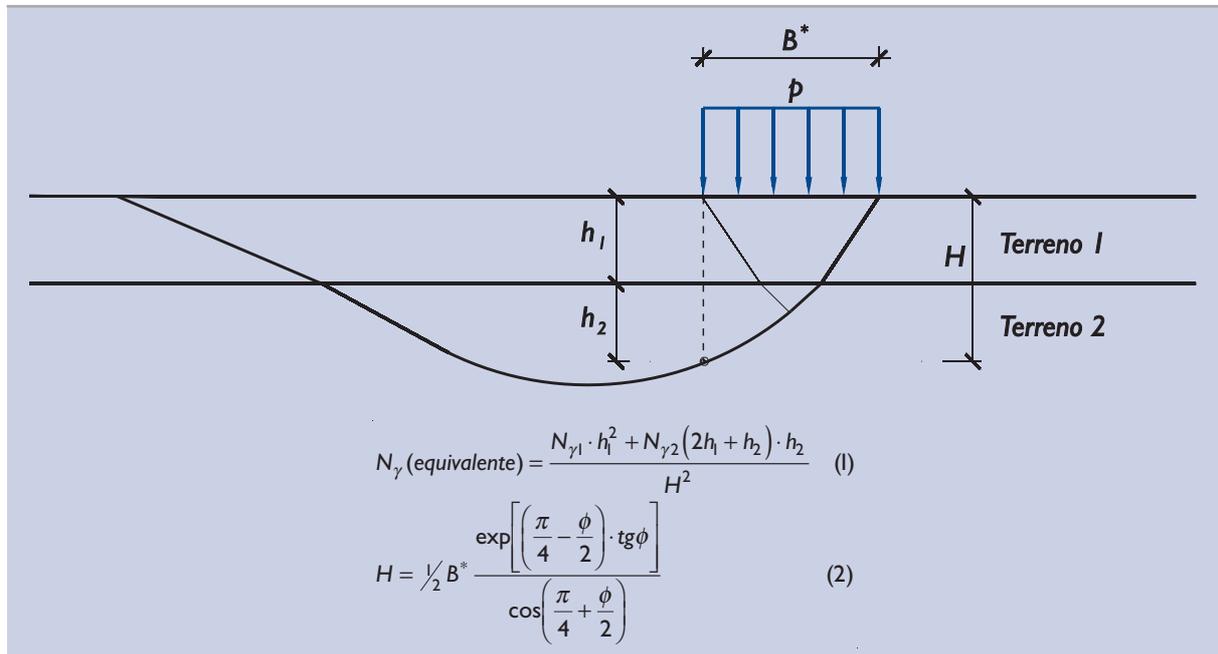
Figura 3.5.5. Cimentaciones en zonas de pendiente



El cálculo de la carga de hundimiento en estos casos es complicado y, por ese motivo, si el tema resultase crítico, debe recurrirse a un cálculo numérico específico, pues no existen soluciones analíticas que resuelvan este problema de un modo general.

En cualquier caso, nunca debe simplificarse el problema “descendiendo” la carga “p” al contacto entre los dos terrenos y después de suponer que el terreno I sólo colabora con su peso. En ese descenso, el ancho de la cimentación equivalente (B^*) puede disminuir de forma notable y no es fácil conocer el valor del cálculo adecuado. Suponer B^* constante en esa operación de descenso virtual de cargas, puede conducir a sobreestimar la carga de hundimiento. Suponer que B^* aumenta en el descenso de carga es una hipótesis poco adecuada, que conduce a resultados excesivamente peligrosos (la carga de hundimiento puede resultar hasta decenas de veces superior a la real).

Figura 3.5.6. Solución aproximada en terrenos heterogéneos



Nota: El ángulo ϕ a utilizar en la expresión (2) es el correspondiente al valor de N_{γ} obtenido en la expresión (1). Su determinación requerirá un cálculo iterativo.

Para aquellos casos en los que no se requiera gran precisión, se puede asimilar el terreno heterogéneo a otro homogéneo cuyo valor del factor de capacidad de carga N_{γ} sea el indicado de la figura mencionada.

Esa forma de interpolación es adecuada siempre que el ángulo de rozamiento del terreno superior sea mayor que el del terreno inferior.

Para promediar la cohesión y la densidad que pudieran existir y, siempre que estos parámetros no sean de gran influencia en el resultado, se pueden utilizar las expresiones aproximadas siguientes:

$$c_{\text{equivalente}} = \frac{c_1 h_1 + c_2 h_2}{H}$$

$$\gamma_{\text{equivalente}} = \frac{\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2}{H}$$

Para cálculos de banquetas granulares sobre suelos blandos se puede utilizar lo antedicho en este apartado al evaluar la capacidad portante en condiciones drenadas. Para analizar la capacidad portante sin drenaje, se tendrá en cuenta lo indicado en el subapartado que sigue.

3.5.4.8.4 CIMENTACIONES EN BANQUETA SOBRE SUELOS COHESIVOS

En las obras portuarias ocurre con alguna frecuencia la situación que se considera en este epígrafe. Un suelo blando es recubierto por un relleno granular (banqueta) en cuya superficie se aplica la carga de cimentación. Normalmente es necesario calcular la carga de hundimiento sin drenaje, suponiendo que la carga aplicada no produce consolidación alguna. La componente vertical de la carga de hundimiento, en esas circunstancias, puede estimarse mediante la expresión siguiente:

$$p_{vh} = p_s + i_s K \frac{H}{B^*} (\gamma \cdot H + 2q)$$

donde:

p_{vh} = presión efectiva vertical que, aplicada sobre la banqueta, produciría el hundimiento.

i_s = coeficiente de inclinación que puede estimarse mediante la expresión:

$$i_s = (1 - 0,5 \operatorname{tg} \delta)^3$$

K = coeficiente que depende del ángulo de rozamiento correspondiente a grandes deformaciones del material de la banqueta.

$$K = 6 \operatorname{tg}^3 \phi$$

γ = peso específico de la banqueta (sumergido, en su caso).

q = sobrecarga sobre la banqueta de extensión indefinida.

p_s = presión que depende de la resistencia al corte del suelo cohesivo y que puede estimarse mediante la expresión siguiente:

$$p_s = (\pi + 2) s_u i_c + q i_q - \gamma H (1 - i_q)$$

i_q = coeficiente de inclinación para sobrecargas que puede tomarse:

$$i_q = (1 - \alpha \operatorname{tg} \delta)^3$$

siendo:

$$\alpha = 0,7 - \frac{\gamma \cdot H}{10 \cdot s_u} > 0,5$$

i_c = coeficiente de inclinación para la resistencia al corte.

Se tomará el que da la expresión siguiente:

$$i_c = \frac{1}{2} (1 + \sqrt{1 - x})$$

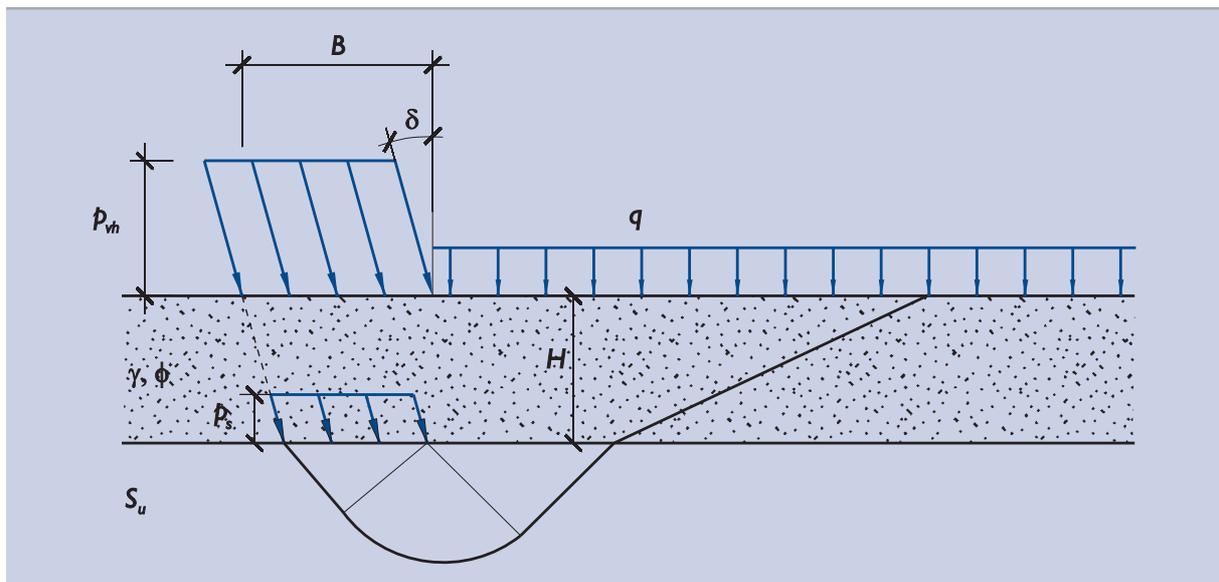
siendo: $x = 10 \operatorname{tg} \delta < 1$

Las variables geométricas B^* , H y δ son las indicadas en la Fig. 3.5.7. El valor de " s_u " representa la resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo. En muchas ocasiones ese dato, s_u , es variable con la presión efectiva vertical, σ'_{vo} , que existe antes de aplicar la carga mediante una relación lineal:

$$s_u = \eta \cdot \sigma'_{vo}$$

donde " η " es un número adimensional que depende de la naturaleza del suelo y de sus parámetros de estado (Ver 2.2.8.3).

Figura 3.5.7. Esquema de la rotura de una banqueta granular apoyada sobre un suelo blando sin drenaje



Para representar este tipo de variación con la profundidad en el problema considerado en este apartado, puede tomarse como valor representativo de s_u el siguiente:

$$s_u (\text{equivalente}) = 3s_{uo} \cdot \frac{2s_{uo} + \gamma B^* \eta}{6s_{uo} + \gamma B^* \eta}$$

siendo:

- s_{uo} = resistencia al corte sin drenaje en el plano de contacto de la banqueta con el suelo cohesivo.
 γ = peso específico (sumergido en su caso) del suelo cohesivo.

3.5.4.9 Seguridad exigible frente al hundimiento

El ingeniero, tras reconocer el terreno, analizar el proyecto y definir la cimentación, habrá utilizado alguno de los procedimientos de verificación de la seguridad frente al hundimiento descritos en 3.5 que resulte adecuado a su situación particular en cuanto a tipo de terreno e importancia de la obra.

Únicamente los métodos que se describen en los apartados 3.5.4.2 y 3.5.4.3 bajo los títulos de “experiencia local” y “ensayos SPT” permiten que una vez comprobado que se cumple la desigualdad:

$$P_{v,comp} \leq P_{v,adm}$$

se dé por verificada la seguridad frente al hundimiento. Además, y sujeto a las limitaciones que allí se indican, se puede dar también por verificada la seguridad frente al Estado Límite de Servicio relativo a asientos de la cimentación.

En cada uno de los procedimientos descritos en 3.5.4.4 hasta 3.5.4.8, es posible calcular, para cada combinación de acciones, una presión vertical actuante y una presión vertical de hundimiento.

El coeficiente de seguridad frente al hundimiento, F , queda definido por:

$$F = \frac{p_{vh}}{p_v}$$

donde:

- $p_{v,h}$ = presión vertical de hundimiento obtenida al aplicar el método de cálculo correspondiente.
 p_v = presión vertical actuante en la hipótesis de carga correspondiente, calculada según se indica en el apartado 3.5.3.2.

Para valores del índice ISA bajos (5 a 19), los valores mínimos recomendados del coeficiente de seguridad son los que se indican a continuación en la Tabla 3.5.4.

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores de F pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10.

No obstante lo anterior, para aquellas obras que tengan un impacto socio-ambiental no significativo ($ISA < 5$), así como cuando se consideren admisibles probabilidades de fallo frente a hundimiento mayores de 10^{-3} , podrán utilizarse menores coeficientes de seguridad que los señalados en la Tabla 3.5.4. En esos casos el ingeniero juzgará si el ahorro consiguiente tiene interés económico comparado con el aumento de las posibilidades de mal comportamiento que conlleva la reducción de la seguridad frente a este modo de fallo. En todo caso, se recomienda que los coeficientes de seguridad frente al hundimiento sean siempre superiores al 80 % del valor consignado en la Tabla 3.5.4.

Tabla 3.5.4. Coeficientes de seguridad frente al hundimiento de cimentaciones superficiales. Valores mínimos recomendados para obras de carácter ISA bajo (5 a 19)

Método de cálculo	Tipo de combinación y Coeficiente, F		
	Cuasi-Permanente, F ₁	Fundamental, F ₂	Accidental o sísmica, F ₃
Ensayos presiométricos	2,6	2,2	2,0
Ensayos de penetración estática	2,6	2,2	2,0
Otros ensayos de campo	3,0	2,5	2,2
Método “suelos firmes y rocas”	2,8	2,3	2,1
Cálculo analítico	2,5	2,0	1,8

Aunque se considera que, en la mayor parte de los casos, los coeficientes de seguridad de la Tabla 3.5.4 están asociados a probabilidades de fallo del orden de 10^{-3} , siempre es conveniente conocer con una mayor precisión la fiabilidad de la cimentación frente al problema de su hundimiento. Por dichas razones, se recomienda que para obras de cierta importancia (categoría A definida en la parte 2 de esta ROM correspondiente a obras índices IRE o ISA alto o muy alto) siempre se calcule específicamente el índice de confianza (o fiabilidad) β . Para realizar este cálculo es conveniente considerar las recomendaciones que se incluyen en el apartado 3.3.10.

Para cada tipo de obra, la fiabilidad mínima exigible ante un modo de fallo, para no considerarlo como fallo principal y, por tanto, para poder despreciarse su contribución en el cálculo de la probabilidad de fallo global de la obra, es la asociada con las probabilidades de fallo que se señalan en 3.2.1.

Si como resultado de estos cálculos se obtuviese un índice de fiabilidad menor que el exigible en dicha tabla, se procederá a aumentarla (mayor número de datos, dimensiones o profundidad de la cimentación más amplia, etc.) hasta superar aquellos mínimos, o bien se valorarán los efectos que tiene en el cálculo de la probabilidad global de fallo de la obra.

3.5.5 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento

3.5.5.1 Consideraciones previas

Este modo de fallo tiene más importancia en las cimentaciones de las estructuras de contención de tierras u oleaje y, por eso, al hablar de ellas en el apartado 3.7, así como en la Parte 4 de esta ROM, se hacen algunas consideraciones complementarias.

Las zapatas aisladas y las zapatas corridas de cimentación suelen ser estables frente al deslizamiento, ya que cuando soportan cargas con inclinación o excentricidad apreciable, se suelen arriistrar entre sí para redistribuir, entre varias unidades de cimentación, las cargas de la estructura.

En cualquier caso, toda cimentación superficial, si no está arriistrada, o el conjunto de cimentaciones arriistradas entre sí deben cumplir los siguientes criterios de estabilidad al deslizamiento.

3.5.5.2 Procedimiento de cálculo

En este apartado se considera, únicamente, el caso más común de cimentaciones establecidas sobre planos horizontales.

En estos casos, la fuerza horizontal que es capaz de hacer deslizar el cimienta sobre su plano de contacto con el terreno se puede estimar mediante la expresión:

$$H_{(\text{rotura})} = V \operatorname{tg} \phi_c + a \cdot S + (E_p - E_a) + R_c$$

donde:

- V = carga vertical efectiva.
- ϕ_c = ángulo de rozamiento del contacto del elemento de cimentación con el terreno.
- a = adhesión cimiento-terreno.
- S = superficie de apoyo.
- E_p = empuje pasivo en la profundidad D (cara frontal que se opone al deslizamiento).
- E_a = empuje activo en la profundidad D (cara trasera).
- R_c = otras posibles resistencias del contorno de los alzados laterales del cimiento.

Es frecuente y recomendable hacer una hipótesis conservadora a la hora de estimar esta fuerza resistente, suprimiendo las componentes de la resistencia debida al terreno situado por encima del nivel de cimentación ($E_p - E_a$) y R_c , ya que:

- a. Su movilización requiere movimientos apreciables que pueden implicar daños en la estructura.
- b. La garantía de continuidad de esos contactos laterales no está siempre garantizada (posibles retracciones del terreno junto a la cimentación).

Únicamente cuando, por las razones particulares del caso en cuestión, se puedan tomar las precauciones constructivas necesarias para garantizar la permanencia de estos contactos y cuando la estructura no sea sensible a los desplazamientos necesarios para movilizar estas resistencias, se podrá justificar la colaboración de la resistencia de los alzados laterales del cimiento.

En la zona próxima al contacto del cimiento con el terreno es difícil evitar cierto remoldeo del terreno, particularmente cuando el agua está próxima a la excavación, y por ese motivo es también frecuente y recomendable suponer que el contacto de la cimentación con el terreno tiene un comportamiento similar al de un terreno remoldeado.

En suelos arcillosos saturados el término de rozamiento tarda cierto tiempo en desarrollarse y es recomendable hacer una comprobación en la hipótesis de $\phi_c = 0$. Ver 2.2.7, cálculo sin drenaje. En ese caso el único término de resistencia sería el correspondiente a la adhesión.

Los valores de la adhesión del cimiento y el terreno, en el caso de suelos arcillosos, pueden suponerse iguales a los indicados en 3.6.4.7.2 para el caso de la adhesión en el fuste de los pilotes ($a = c'$).

Como área de contacto S debe considerarse el área efectiva $B^* \times L^*$. Estas dimensiones se definen en el apartado 3.5.3.2.

En los casos en que la seguridad al deslizamiento sin drenaje resulte crítica, es posible drenar el contacto terreno cimiento (hormigón poroso de contacto, por ejemplo) de manera que se eviten las presiones intersticiales altas justo en el plano de contacto. La mejora que se puede conseguir en esos casos requiere un estudio específico.

Finalmente, en las situaciones a largo plazo, es recomendable suponer que toda la resistencia al deslizamiento es debida a la componente de fricción. El ángulo de rozamiento a utilizar en el cálculo de la fuerza horizontal que produce el deslizamiento dependerá de las condiciones de cada caso y del ángulo de rozamiento del terreno. Los valores recomendados son:

- ◆ Cimentaciones sobre arcillas saturadas sin medidas de drenaje del contacto.

$$\phi_c = 0$$

- ◆ Cimentaciones sobre arcillas saturadas con medidas de drenaje del contacto.

$$\operatorname{tg} \phi_c \leq \frac{1}{2} \operatorname{tg} \phi$$

(El valor de ϕ_c será tanto mayor cuanto más efectivo se postule el drenaje).

- ◆ Cimentaciones prefabricadas, a largo plazo.

$$\phi_c = \frac{2}{3}\phi$$

- ◆ Cimentaciones hormigonadas contra el terreno y cálculos a largo plazo.

$$\phi_c = \phi$$

En los muelles de gravedad formados por bloques de hormigón es necesario comprobar el posible deslizamiento a lo largo de planos de contacto hormigón-hormigón. Si el ángulo de rozamiento en cuestión resultase crítico, será necesario hacer ensayos especiales para determinarlo o consultar la bibliografía técnica para situaciones parecidas. De otra forma, los contactos entre hormigones prefabricados se supondrán con un ángulo de rozamiento $\phi_c = 35^\circ$ ($\mu = \text{tg } \phi_c = 0,7$).

En las cimentaciones de hormigón prefabricado sobre escolleras, cabe el mismo comentario anterior; el conocimiento de este dato específico del rozamiento del hormigón con las banquetas de enrase en cada obra es un aspecto esencial del proyecto. Para obras de poca importancia y cuando el problema de deslizamiento no resulte crítico, se podrá suponer que el ángulo de rozamiento para el cálculo de la seguridad al deslizamiento, a falta de información específica, será $\phi_c = 32^\circ$ ($\mu = \text{tg } \phi_c = 0,625$).

En las cimentaciones de hormigón in situ sobre escollera, también sujetas al mismo comentario sobre el interés y la conveniencia de estudios específicos, se puede suponer, a falta de información, $\phi_c = 40^\circ$ ($\mu = \text{tg } \phi_c = 0,84$).

En los tres casos comentados en los párrafos precedentes, el término de adhesión o cohesión se considerará nulo.

Son excepción a este procedimiento de cálculo aquellos cimientos en los que la seguridad al deslizamiento resulta crítica y en los que se hagan disposiciones de proyecto especiales para aumentar la seguridad. En esos casos el procedimiento de cálculo para verificarla habrá de establecerse específicamente, teniendo en cuenta los principios y filosofía que se indican en este apartado.

3.5.5.3 Seguridad frente al deslizamiento

La seguridad frente al deslizamiento se considera suficiente cuando se verifica:

$$F \leq \frac{H_{(rotura)}}{H}$$

donde:

- H = carga horizontal actuante
- $H_{(rotura)}$ = carga horizontal que produce la rotura
- F = coeficiente de seguridad que se indica en la Tabla 3.5.5.

Tabla 3.5.5. Coeficientes de seguridad mínimos frente al deslizamiento horizontal. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)

Tipo de combinación	Coeficiente de seguridad al deslizamiento, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,5
Fundamental, F_2	1,3
Accidental o Sísmica, F_3	1,1

En cimentaciones inclinadas los conceptos vertical y horizontal deben entenderse como normal y tangencial respecto al plano de cimentación.

En aquellos casos en los que se haya contado con la colaboración del terreno existente por encima del plano de cimentación (rozamiento en alzados laterales o empuje pasivo), se deben verificar, además, que estos términos de resistencia no suponen más del 15% de la resistencia total al deslizamiento.

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.5.5 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo, podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

3.5.6 Verificación de la seguridad frente al vuelco

Las cimentaciones superficiales mediante zapatas arriostradas o mediante losas no suelen volcar, ya que las excentricidades de las acciones suelen compensarse con el sistema de arriostramiento. El vuelco es más típico de cimentaciones corridas, especialmente el de las estructuras de contención (muros, muelles de gravedad, etc.).

Aparte de las consideraciones específicas que se indican más adelante en otros apartados de esta ROM, la verificación de la seguridad al vuelco debe realizarse en todos aquellos casos en los que la tipología de la cimentación (zapatas corridas sin arriostramiento, por ejemplo) o por la naturaleza del terreno (cimentaciones muy excéntricas sobre roca, por ejemplo) el vuelco sea más probable.

Para verificar la seguridad frente al vuelco han de considerarse dos modos de fallo diferentes. El primer modo de fallo, que en lo sucesivo se denominará “vuelco rígido”, corresponde a un estado límite último, ELU, de pérdida de equilibrio y es clasificado en esta ROM como tipo EQU de los definidos en el apartado 3.3.1. El segundo modo de fallo se define en esta ROM como “vuelco plástico” y está condicionado de manera esencial por las características del terreno. Por ese motivo, se trata de un Estado Límite Último de tipo geotécnico (Tipo GEO en la definición dada en 3.3.1). Los procedimientos de análisis de ambos modos de fallo se describen en los apartados que siguen.

3.5.6.1 Vuelco rígido

El vuelco rígido, como cualquier modo de fallo, es una concepción teórica simplificada que trata de representar un posible mecanismo de rotura. En este caso, para simplificar el problema, se supone que el terreno es infinitamente resistente y la estructura de la cimentación también, de manera que se pudiera producir un giro de la cimentación como sólido rígido respecto a una arista del área de apoyo (cimentaciones rectangulares).

El estudio debe iniciarse con la definición de las acciones de cálculo y de sus combinaciones. Para ello se seguirán, a falta de otras instrucciones específicas que pudieran indicarse en la normativa obligatoria o en otros documentos del Programa ROM, las recomendaciones que se indican en el apartado 3.3.6. Se recuerda que allí se indican, como coeficientes de ponderación de las acciones, los valores siguientes:

◆ Acciones permanentes

Desfavorable	$\gamma_g = 1,0$
Favorable	$\gamma_g = 0,9$

◆ Acciones variables

Desfavorable	$\gamma_q = 1,5$
Favorable	$\gamma_q = 0,0$

Para estudiar el vuelco rígido sólo será necesario considerar las combinaciones fundamentales y las extraordinarias (accidentales o sísmicas). No es necesario considerar la combinación cuasi-permanente, que sólo se

recomienda en esta ROM para analizar Estados Límite Últimos cuando estos son de tipo GEO. Y el vuelco rígido no es el caso geotécnico.

La clasificación de las acciones (o del efecto de las acciones) como favorables o desfavorables requiere cierto criterio del proyectista. En este apartado y en el apartado 3.7.1.3 se dan algunos criterios que pueden orientar en este tema.

Conocidas las acciones y combinadas adecuadamente, se debe calcular la ubicación del punto de paso de su resultante en el plano de contacto de la zapata con el terreno. La comprobación se dará por concluida cuando ese punto quede dentro del área de apoyo.

En cualquier caso se recomienda que, salvo una justificación especial, en todas las solicitaciones permanentes o cuasi-permanentes, la resultante efectiva de las acciones esté situada dentro del núcleo central de la cimentación; de otra forma existiría una zona del cimientamiento frecuentemente (o permanentemente) despegada que puede ser problemática en el comportamiento a largo plazo.

Los coeficientes de ponderación indicados son los que se recomiendan en la mayoría de los tratados sobre el tema y se interpreta que corresponden a las obras de ISA alto que se definen dentro del Programa ROM. En consecuencia se recomienda que dichos coeficientes sean modificados cuando se trata de verificar el vuelco en obras de otro carácter. A falta de mejor información, se sugiere llevar a cabo esa modificación del mismo modo que se sugiere para el coeficiente de seguridad en geotecnia indicado en 3.3.8.2.

En todo caso, no siendo este modo de fallo de tipo geotécnico, el método de análisis del vuelco rígido de cada estructura particular debe buscarse en la ROM específica correspondiente.

3.5.6.2 Vuelco plástico

Las estructuras portuarias pueden experimentar un tipo de rotura similar al vuelco rígido. Cuando la resultante de las acciones sobre el terreno se acerca al borde del área de apoyo se puede producir una concentración de tensiones tal que provoque la rotura local (plastificación) en esa zona. El terreno cedería, la estructura se inclinaría e, incluso, si no hubiera otros elementos de sustentación que pudieran contener el movimiento, llegaría a producirse el vuelco con la consiguiente ruina de la obra.

El vuelco plástico recibe su adjetivo precisamente de la plastificación local que tiene lugar en el borde de la zona de apoyo cuando se produce este mecanismo de fallo. Como se verá, en el procedimiento de análisis que aquí se indica, la resistencia del terreno juega un papel que puede ser importante y por ese motivo se ha clasificado en esta ROM como modo de fallo tipo GEO, de los definidos en 3.3.1.

Se define como coeficiente de seguridad frente al vuelco plástico el número por el que habría que multiplicar H (componente horizontal de la resultante de las acciones) para provocar la plastificación local del terreno. De acuerdo con la notación indicada en la Fig. 3.5.8, se tendría para F varias definiciones equivalentes:

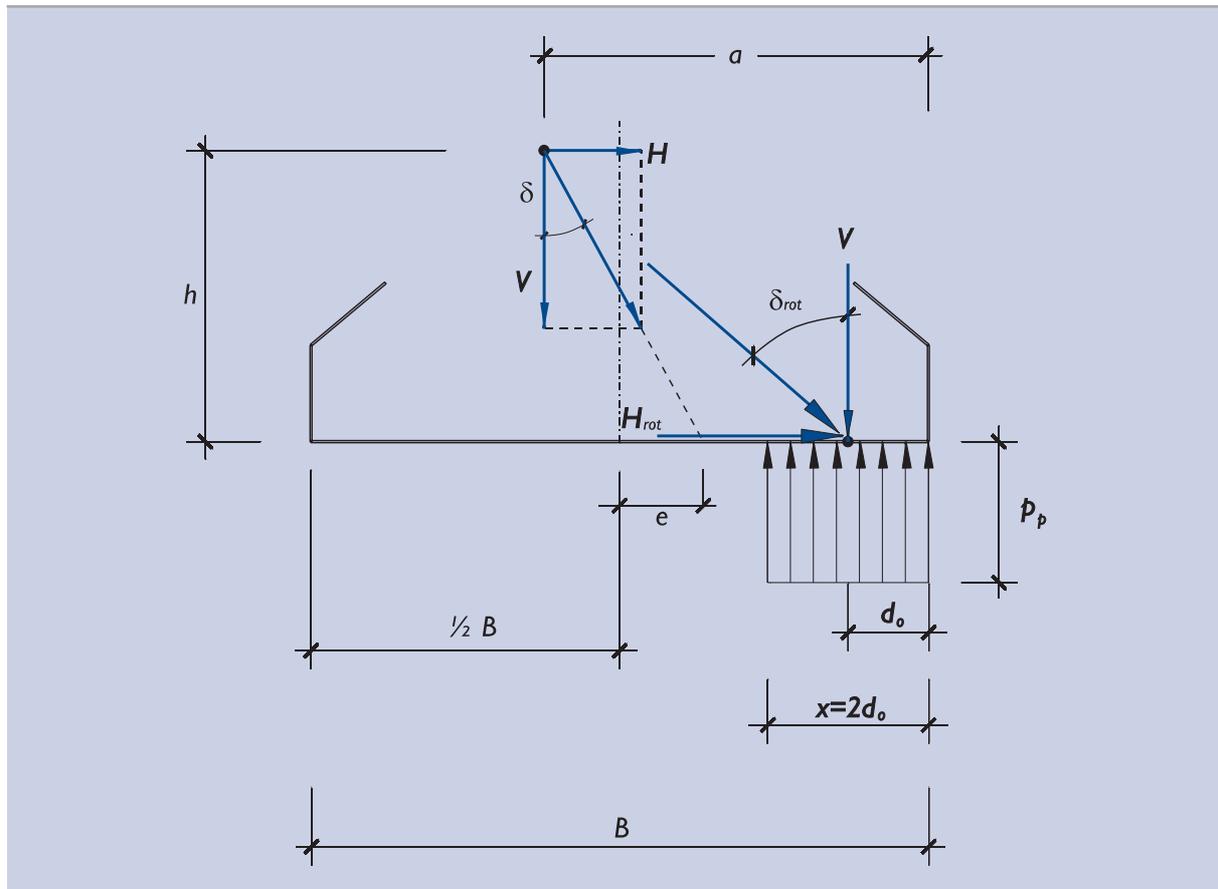
$$F = \frac{H_{rot}}{H} = \frac{tg\delta_{rot}}{tg\delta} = tg\delta_{rot} \cdot \frac{V}{H}$$

Al aumentar paulatinamente H para alcanzar la plastificación local del terreno, el resto de factores que definen la situación de proyecto quedarían constantes. Esos factores son, aparte de los parámetros geotécnicos, la resultante vertical de las acciones y las distancias a y h que definen los brazos de H y V.

Comentario: La misma definición del coeficiente de seguridad se obtiene si se utiliza la expresión:

$$F = \frac{M_{res}}{M_{vol}}$$

Figura 3.5.8. Comprobación del vuelco plástico



siendo:

M_{res} = momento de la fuerza horizontal que provocaría la rotura = $H_{rot} \cdot h$. Es el máximo momento resistente.

M_{vol} = momento volcador de la fuerza horizontal = $H \cdot h$.

La condición de rotura se alcanza cuando el valor medio de la componente vertical de la presión que actúa en la zona comprimida iguala a la presión que produce la plastificación local del terreno. En general se puede suponer que esta presión es igual a la presión vertical de hundimiento, p_{vh} , definida en el apartado 3.5.4.

La forma general de cálculo de F incluye un proceso iterativo, haciendo crecer H, conservando como se ha dicho el resto de factores constantes, hasta que se obtenga la condición de rotura y obtener así el valor H_{rot} .

En cada una de las iteraciones de cálculo, se obtendrán diferentes anchos de cimentación equivalente, B^* , y una inclinación de las acciones distinta, δ , y esto requerirá un cálculo específico de p_{vh} en cada iteración, pues su valor depende, entre otros, de esos dos parámetros.

Si se dispone de una rutina de cálculo de la carga de hundimiento por algún procedimiento de los descritos en 3.5.4, bastaría con cambiar la componente horizontal de la acción, H, conservando constante su brazo, h, hasta conseguir que ocurra el hundimiento (coeficiente de seguridad frente al hundimiento igual a la unidad).

En esta ROM se definen varios métodos de estudio del hundimiento. Alguno de ellos, dependiendo del tipo de terreno y del tipo de información disponible, habrá sido usado en la verificación del hundimiento de la cimentación. Ese mismo método puede y debe usarse ahora nuevamente para analizar el vuelco plástico.

Para ello y dada la casuística específica del vuelco, conviene tener en cuenta las observaciones que se indican a continuación.

a. Cálculo del coeficiente de seguridad con métodos empíricos

Aunque todos los procedimientos de cálculo de la carga de hundimiento tienen cierta componente empírica, se entiende aquí como procedimientos empíricos de la carga de hundimiento de cimentaciones superficiales a todos los citados y descritos en 3.5.4 a excepción del conocido como método analítico de Brinch Hansen que se describe en el apartado 3.5.4.8.

Para el método descrito en 3.5.4.2 (experiencia local contrastada), se usará como valor de la presión de plastificación local, p_p , un valor igual al triple de la presión que la experiencia indique como admisible en cimentaciones de pequeña anchura, multiplicado por el factor f_δ . Esto es:

$$p_p = 3 \cdot p_{vadm} \cdot f_\delta$$

donde:

$$f_\delta = (1,1 - \text{tg } \delta)^3$$

En todo este apartado, el ángulo δ se refiere a la inclinación de la carga respecto a la vertical.

Para el método descrito en 3.5.4.3 (cimentaciones en arena en función del ensayo SPT), se utilizará como valor de presión de plastificación, p_p , un valor igual a tres veces el valor de p_{vadm} que se define en ese apartado, calculado para el caso de un ancho de cimentación pequeño y multiplicado por f_δ , que se acaba de definir. Adviértase que para cimentaciones algo enterradas, se obtendría como máximo:

$$p_p = 48 \cdot N \cdot f_d \text{ kPa} \quad (N = \text{índice SPT correspondiente a la zona de apoyo}),$$

cuando el terreno está seco, y como máximo la mitad del indicado, cuando esté sumergido. Véanse allí los detalles para un cálculo más preciso.

Para el método de cálculo basado en los ensayos presiométricos (apartado 3.5.4.4) y el basado en ensayos presiométricos estáticos (apartados 3.5.4.5) se adoptará:

$$p_p = p_{vh}$$

calculando p_{vh} como allí se define para valores pequeños del ancho de cimentación B^* (cuando B^* es pequeña el factor D/B^* se puede suponer igual a la unidad, siempre que la cimentación esté algo enterrada).

El método basado en otros ensayos de campo (apartado 3.4.5.6) requiere la traducción de resultados, por correlación, con los métodos precedentes. Una vez realizada la equivalencia correspondiente, podrá ser también usado para calcular p_p .

Si se utiliza el método descrito en el apartado 3.5.4.7 dedicado a suelos cohesivos firmes y rocas se podrá suponer:

$$p_p = p_{vh}$$

calculando p_{vh} para el caso de B^* (ancho equivalente de la cimentación) pequeño. En general se considera que el valor de f_D , que allí se define, tiene el valor unidad, $f_D = 1$.

En cualquiera de estos métodos resulta que p_p es función del ángulo δ , de desviación de las acciones respecto a la vertical. Esto es, p_p se podrá expresar de la manera siguiente:

$$p_p = p (1,1 - \operatorname{tg} \delta)^3$$

Conocido el valor de p , con alguno de los procedimientos indicados, se puede plantear la condición de vuelco plástico de la siguiente manera:

$$(a - h \operatorname{tg} \delta_{rot})(1,1 - \operatorname{tg} \delta_{rot})^3 = \frac{V}{2p}$$

Los valores de a , h y V se indican en la Fig. 3.5.8 y la forma de obtenerlos se ha descrito en el apartado precedente. En este apartado se recomiendan procedimientos para obtener el valor de p . Con ello se puede calcular el valor δ_{rot} y, con él, el coeficiente de seguridad buscado:

$$F = \operatorname{tg} \delta_{rot} \cdot \frac{V}{H}$$

b. Cálculo del coeficiente de seguridad con la fórmula polinómica de Brinch Hansen

Cuando se utilice este método de cálculo debe procederse a una serie de tanteos suponiendo, en cada uno de ellos, un resultado predeterminado para el coeficiente de seguridad al vuelco que se busca.

Para un tanteo determinado se supondrá que el coeficiente de seguridad al vuelco es F_i . Con esta hipótesis se obtendrán las dos componentes de la resultante de las acciones:

componente vertical = V ,

componente horizontal = $F_i \cdot H$,

y se calculará el momento correspondiente respecto al borde de la cimentación:

$$M = V \cdot a - F_i \cdot H \cdot h$$

Este momento debe resultar positivo; de otra forma, sería necesario reducir F_i . El coeficiente de seguridad al vuelco plástico es siempre inferior al valor límite $F_{m\acute{a}x} \leq (V \cdot a) / (H \cdot h)$.

Después debe calcularse la distancia del punto de paso de la resultante al borde de la cimentación (ver Fig. 3.5.8):

$$d_0 = \frac{M}{V}$$

Con esto se obtienen los parámetros de cálculo necesarios para entrar en la fórmula polinómica, que son:

$$\operatorname{tg} \delta = F_i \cdot \frac{H}{V} \quad \text{y} \quad B^* = 2 \cdot d_0$$

Y además se tiene el resto de factores (resistencia del terreno, sobrecarga de tierras, etc.), que son los mismos en cada iteración.

La utilización de la fórmula polinómica conducirá a un valor de p_{vh} , que habrá de compararse con el valor de la presión vertical correspondiente al valor de F_i supuesto, que es:

$$p_p = \frac{V}{B^*}$$

El cálculo se dará por concluido si $p_p = p_{vh}$; de otra forma habrá que repetir el proceso hasta lograr una convergencia suficientemente precisa.

3.5.6.3 Seguridad frente al vuelco plástico

En general y salvo una indicación específica en contra que pueda darse en la Parte 4 de esta ROM o en alguna normativa de obligado cumplimiento o en algún documento de edición posterior a éste, dentro del Programa ROM, la seguridad frente al vuelco plástico de las obras de ISA bajo (5 a 19) se considera aceptable siempre que el coeficiente de seguridad que se acaba de definir supere los umbrales mínimos siguientes.

Tabla 3.5.6. Coeficientes de seguridad mínimos frente al vuelco plástico. Obras de carácter ISA bajo (5 a 19)

Tipo de combinación	Valor mínimo, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,5
Fundamental, F_2	1,3
Accidental o Sísmica, F_3	1,1

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.5.5 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo, podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

3.5.7 Asientos y otros movimientos de las cimentaciones

3.5.7.1 Zapatas aisladas

En aquellos casos en los que las cimentaciones mediante zapatas aisladas se hayan proyectado de acuerdo con la experiencia previa (apartado 3.5.4.2) o en función de resultados de ensayos SPT en terrenos granulares (apartado 3.5.4.3) no son de esperar asientos superiores a 2,5 cm (una pulgada).

En cimentaciones sobre terrenos granulares, cuya compacidad se haya determinado mediante ensayos SPT, puede seguirse el procedimiento de cálculo de asientos indicado por J.B. Burland y M.C. Burbidge⁽¹⁰⁾ (1985).

El cálculo del asiento de una cimentación aislada se puede realizar aplicando las soluciones de la teoría de la elasticidad que figuran en los textos dedicados a cimentaciones. En la Fig. 3.5.9 se recogen algunas de las fórmulas deducidas con esa teoría que pueden resultar de más interés.

Los movimientos horizontales y los giros pueden ser de interés en algunos casos; y por eso, en la Fig. 3.5.9, se incluyen también algunas soluciones típicas que pueden permitir la estimación de esos movimientos.

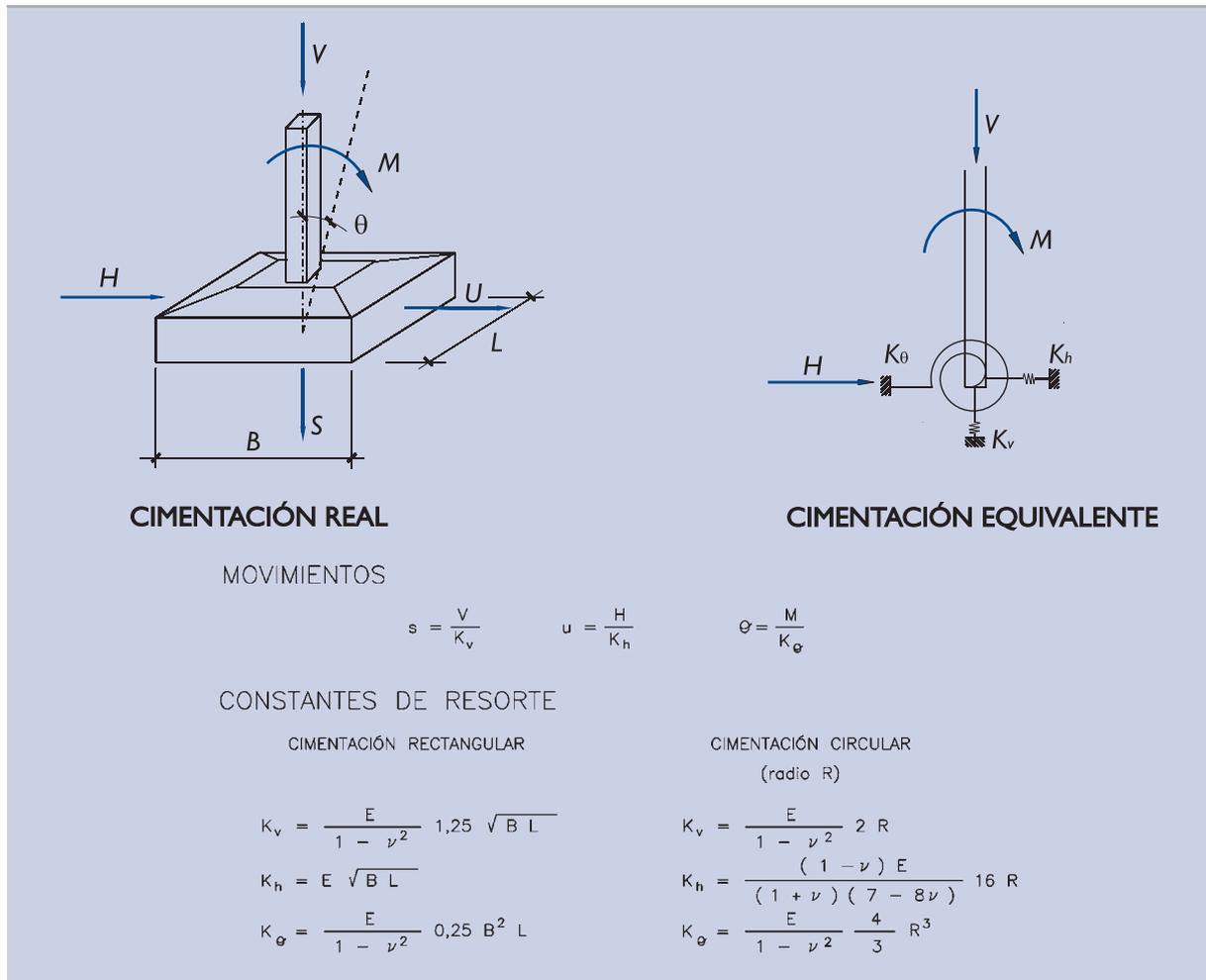
Para las cimentaciones superficiales mediante zapatas aisladas en arcillas saturadas, el movimiento instantáneo puede calcularse con unos parámetros elásticos aparentes que están relacionados con los correspondientes del esqueleto del suelo, mediante las expresiones siguientes:

$$v_{aparente} = 0,5$$

$$E_{aparente} = \frac{1,5}{1 + \nu} \cdot E$$

(10) "Settlements of foundations on sand and gravel". Proc. Inst. of C.E. London.

Figura 3.5.9. Movimiento de zapatas aisladas y Constantes de Resorte para cálculos de interacción suelo-estructura



A largo plazo, en arcillas saturadas, se produciría el asiento correspondiente a los parámetros elásticos del terreno E y ν .

Además, tanto en arenas como en arcillas, existe un asiento de fluencia secundaria que puede durar incluso años y que puede suponer un porcentaje considerable del asiento elástico calculado con los parámetros efectivos de deformación. La magnitud de ese asiento es difícil de estimar y únicamente la experiencia y la observación permiten precisarlas.

Por este motivo habrá de suponerse, salvo que haya información específica contrastada, que las acciones correspondientes a la combinación de acciones cuasipermanente puede producir, a largo plazo, un asiento adicional de hasta el 20% del asiento elástico correspondiente.

La flexibilidad de las cimentaciones aisladas influye en los esfuerzos de la estructura; y por eso las mismas soluciones de la teoría de la elasticidad, que relacionan cargas y movimientos, se deben utilizar para representar, mediante unos resortes, la deformabilidad del cimiento en los cálculos estructurales en los que convenga introducir el efecto de interacción suelo-estructura.

En las fórmulas indicadas en la Fig. 3.5.9 no se cuenta con la colaboración del empotramiento o profundidad de cimentación, que puede reducir los movimientos a valores mucho menores. Para contar con ése y otros posibles efectos favorables ha de consultarse la bibliografía técnica especializada o realizar cálculos numéricos que se salen del alcance de esta ROM.

3.5.7.2 Cimentaciones corridas

b. Cimentaciones corridas rígidas

Los movimientos de las cimentaciones rígidas con formas alargadas se pueden estimar mediante las fórmulas indicadas en la Fig. 3.5.9.

Para longitudes grandes, tanto el asiento como el desplazamiento horizontal calculados así crecen indefinidamente; no lo hace sin embargo el giro de la cimentación. Este defecto de la teoría de la elasticidad utilizada, que supone un módulo de elasticidad uniforme con la profundidad, es difícil de paliar salvo en aquellas situaciones en las que exista un fondo rocoso que se pueda suponer indeformable. En esos casos, para el cálculo del asiento se pueden aplicar el método de Steinbrenner descrito en 3.5.7.3.

Dado que la relación

$$K_h = 0,8 (1 - \nu^2) K_v$$

existe, independientemente de la longitud, para las cimentaciones alargadas, esta expresión puede utilizarse para estimar movimientos horizontales una vez calculados los asientos.

b. Cimentaciones corridas flexibles

Los asientos de las cimentaciones flexibles son, como media, los mismos que los de las cimentaciones rígidas de iguales dimensiones en planta. El movimiento del terreno no será uniforme y, por lo tanto, para los posibles cálculos de interacción suelo-estructura no se deben concentrar en un sólo punto los resortes equivalentes a representar la deformación del terreno.

En el apartado que sigue se indican algunas ideas para el caso de losas. Esas ideas serían aplicables también a estas cimentaciones flexibles corridas.

3.5.7.3 Asientos de losas y cargas extensas

Los movimientos principales de las losas de cimentación y de otras cargas extensas de superficie son los asientos.

El procedimiento más adecuado para calcular los asientos de cargas extensas es el conocido como método de Steinbrenner, cuyas fórmulas se indican en la Fig. 3.5.10.

Para calcular el acortamiento de un cierto estrato de terreno "i" ha de suponerse que todo el subsuelo es homogéneo y formado por ese terreno. Las fórmulas permitirán calcular los asientos a las dos profundidades que delimitan el estrato y su diferencia será, por lo tanto, el acortamiento buscado.

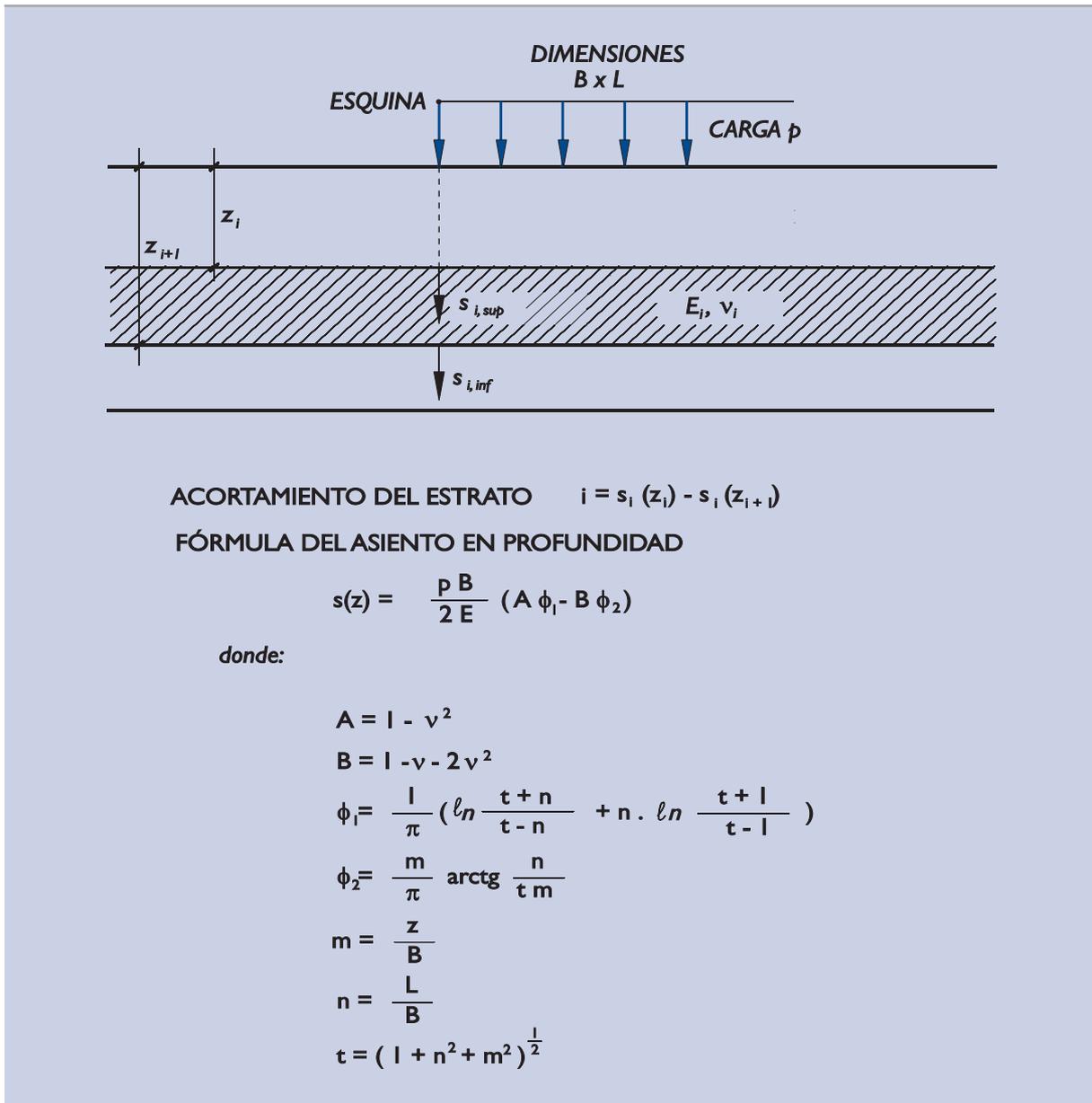
La suma de acortamientos de cada uno de los estratos permite evaluar el asiento de la superficie.

Las fórmulas indicadas corresponden al asiento bajo la esquina de un área rectangular cargada. La superposición de varias cargas de este tipo puede permitir la representación del caso en estudio.

Calculados los asientos en distintos puntos, se pueden preparar constantes de resorte que, distribuidas por los nudos de cálculo de la estructura de la losa de cimentación, produzcan una situación de asientos similar a la obtenida con estos cálculos, cuando se empleen después en un análisis suelo-estructura con distintas combinaciones de carga.

Algo más simples, aunque menos recomendables, son los cálculos de interacción realizados con la aplicación de los coeficientes de balasto. Las constantes de resorte, en esos casos, son de tipo uniforme en toda la extensión de la losa y directamente proporcionales al área asignada a cada nudo. La curvatura inducida por la deformación del terreno bajo cargas uniformes no quedaría representada.

Figura 3.5.10. Fórmulas del método de Steinbrenner



3.5.7.4 Asientos admisibles

Los movimientos que experimenta un cimiento comienzan a producirse tan pronto como se inicia la construcción. A medida que se van colocando las cargas, se van produciendo los movimientos y por eso son sólo parte de los movimientos totales los que pueden tener efectos negativos en la estructura.

Por otro lado, con la estructura construida, se pueden producir movimientos no sólo por las oscilaciones de las cargas de utilización y por la fluencia indicada en 3.5.7.1, sino también por otras causas externas tales como variaciones del nivel freático, actividad de construcción próxima (excavaciones, rellenos, acopios) o incluso vibraciones, ya sean debidas a la actividad de la construcción, de la explotación o incluso debidas a efectos sísmicos. El juicio del ingeniero es, en este caso particular, importante para estimar los movimientos que pueden afectar a la estructura.

Las fórmulas elásticas mencionadas en los apartados anteriores son aplicables al estudio de los movimientos que provocan en ciertas geometrías de cimentación la aplicación de ciertas cargas. El ingeniero debe investigar qué cargas son las que provocan los movimientos que pueden afectar a la estructura o, en términos más generales, a la solución cuyo proyecto se analiza y cuál es la amplitud de los movimientos que se pueden admitir.

En este apartado se pretende dar cierta ayuda en la evaluación de los movimientos límites o movimientos máximos admisibles.

Los movimientos admisibles dependen del tipo de estructura y pueden ser desde muy pequeños, del orden de milímetros (cimentaciones de equipos sensibles), hasta muy grandes, de varios centímetros e incluso decímetros, cuando se habla de asientos de muelles de bloques, por ejemplo.

El movimiento diferencial entre dos partes de una estructura es el que puede introducir esfuerzos que la dañen y ese movimiento diferencial será una fracción del movimiento total. Se denomina distorsión angular al cociente entre el movimiento diferencial y la distancia entre los puntos que se produce. Las estructuras normales de hormigón y acero pueden soportar distorsiones del orden de 1/150 como máximo; esa tolerancia puede ser hasta sólo la mitad (1/300) si soportan cerramientos rígidos que puedan agrietarse.

Está muy extendido, en estructuras de edificación normales, limitar las distorsiones angulares a 1/500.

En cuanto a giros del cimiento, los valores admisibles pueden ser muy variados, aunque se consideran límites los siguientes valores:

- ◆ Muros y estructuras de contención. Inclinación máxima admisible 0,6%.
- ◆ Estructuras isostáticas de hormigón o de acero, tanques de almacenamiento de acero, 0,4%.
- ◆ Estructuras hiperestáticas de hormigón o de acero, edificios normales de estructura de hormigón armado, 0,2%.
- ◆ Estructuras de soporte de maquinaria sensible a los movimientos, 0,1%.

En cuanto a asientos máximos, la limitación más usual, aparte de la relativa a las posibles distorsiones angulares, es de 2,5 cm en cimentaciones aisladas y de hasta 5 cm en cimentaciones mediante losa.

Los movimientos límites correspondientes a cada proyecto deben definirse mediante un procedimiento razonado para cada caso concreto; los valores límites admisibles que se mencionan aquí deben considerarse únicamente a título orientativo.

3.5.8 Consideraciones sobre el proyecto estructural

La parte de la estructura en contacto con el terreno (estructura de la cimentación) debe proyectarse como otro elemento estructural más.

En los cálculos de verificación de esa estructura, las reacciones del terreno que se obtienen de los cálculos geotécnicos descritos en los puntos precedentes deben ser consideradas como acciones de las tierras contra la estructura.

Estas acciones del terreno tendrán el mismo carácter que la acción externa que las causa.

Dado que los procedimientos de verificación de la seguridad en los cálculos estructurales exigen otra consideración de las acciones (coeficientes de mayoración de acciones correspondientes a estados límite últimos tipo STR), se recomienda realizar cálculos geotécnicos complementarios para estimar las reacciones del terreno ante las situaciones de proyecto planteadas en los cálculos estructurales, al verificar los Estados Límite Últimos y de Servicio en la cimentación.

3.6 CIMENTACIONES PROFUNDAS

3.6.1 Aspectos generales

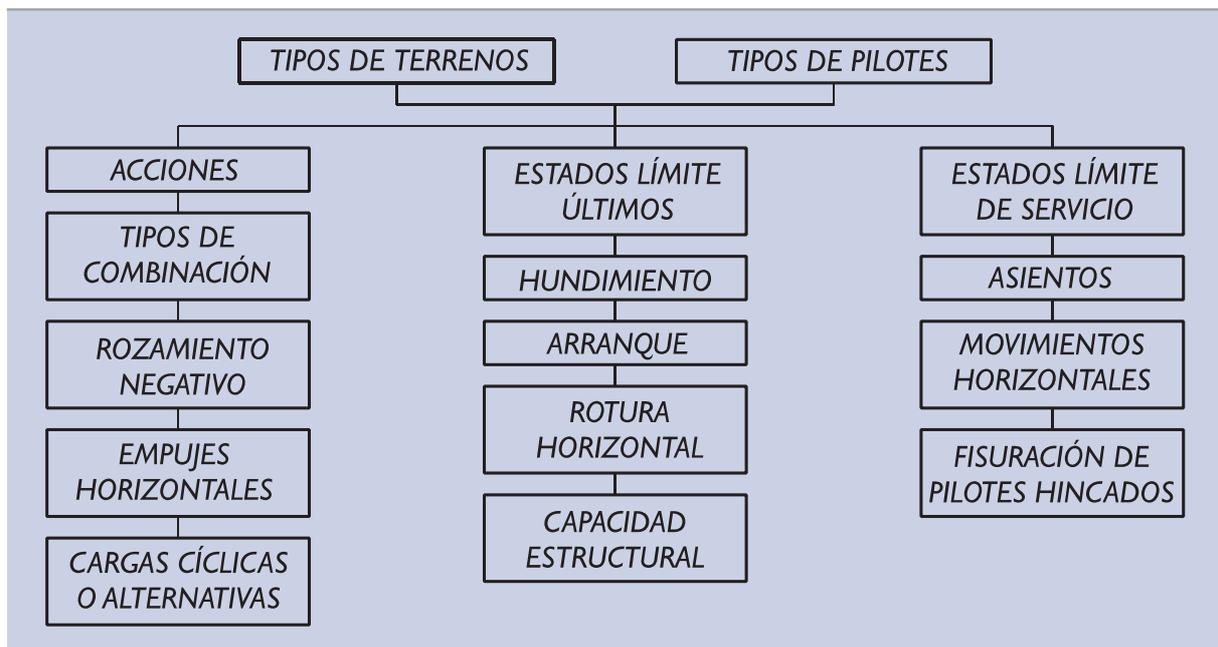
La presencia de suelos poco resistentes cerca de la superficie del terreno es una razón, de entre otras, que puede obligar a transferir las cargas a cierta profundidad. Uno de los procedimientos más habituales para establecer cimentaciones profundas es el pilotaje y de él se tratará en este apartado.

Los temas sobre los que se hacen recomendaciones son los indicados en el esquema de la Fig. 3.6.1. Unos se refieren a la forma de evaluar la seguridad frente a algunos Estados Límite Últimos y otros se refieren a recomendaciones sobre el proceso de evaluación de algunos Estados Límite de Servicio.

Esta Recomendación no cubre todos los aspectos que puedan aparecer y que deben contemplarse en el proyecto de cimentaciones profundas. Tratando de paliar esa falta, se han incluido ciertas consideraciones de índole general al hablar de los Estados Límite Últimos y de los Estados Límite de Servicio.

Como quiera que para el desarrollo de este tema se utilizan ciertas formas particulares de análisis, según sea el tipo de terreno o el tipo de pilote, se comienza con unos apartados dedicados a esos dos aspectos donde se definen los conceptos necesarios para el desarrollo subsiguiente de las Recomendaciones.

Figura 3.6.1. Principales temas a considerar en cimentaciones profundas



3.6.1.1 Tipos de terreno

A efectos de las comprobaciones y cálculos a realizar en este tema de las cimentaciones profundas pilotadas, se distinguen tres tipos fundamentales de terreno: las rocas, los suelos granulares y los suelos cohesivos.

El tipo de terreno que pueda aparecer en un determinado emplazamiento será, con frecuencia, heterogéneo y por lo tanto requerirá una clasificación por zonas en una de las tres categorías antes mencionadas.

Será también frecuente la existencia de terrenos de transición difícilmente clasificables en una u otra categoría. En esos casos, el ingeniero debe hacer sus comprobaciones tal como aquí se indica, con varias hipótesis de clasificación y adoptar, como resultados de sus análisis, los correspondientes a la hipótesis que, siendo razonable, resulte más conservadora.

Las definiciones de estas tres categorías de terrenos, así como los datos necesarios para el estudio de un pilotaje son los que se mencionan a continuación:

a. Rocas

A los efectos del estudio de los pilotajes, se considerará como rocas a aquellos terrenos que:

- ◆ En sondeos cuidados realizados a rotación permitan recuperar más del 50% del testigo.
- ◆ La resistencia a compresión simple de los testigos sanos supere sistemáticamente la carga de 1 MPa.
- ◆ Los agregados minerales que las forman son estables en el tiempo; sin cambios sustanciales durante la vida útil de la obra.

Como puede verse, dentro de esta categoría podrían quedar incluidas algunas arcillas sobreconsolidadas y podrían quedar excluidas las rocas muy alteradas o muy diaclasadas.

Para el estudio de cimentaciones en roca es necesario conocer la topografía del fondo rocoso, su naturaleza, describir su diaclasamiento, su grado de alteración y la resistencia a compresión simple de los fragmentos más sanos.

Además, si por la índole del proyecto se requieren estudios de deformaciones de la cimentación, sería necesario conocer los módulos de deformación de la roca.

Los reconocimientos adecuados a estos fines se describen en la Parte 2 de estas Recomendaciones.

b. Suelos granulares

Se definen como suelos granulares aquéllos que no tienen cohesión. Se supondrá, además, que tienen una permeabilidad apreciable, de manera que los procesos de variación de presiones intersticiales en su interior ocurren en plazos insignificantes comparados con los de aplicación de las cargas de cimentación. La permeabilidad mínima para esta clasificación es de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s.

Dentro de este grupo de suelos granulares quedarían comprendidos las arenas y las gravas, aun con contenidos de finos limosos apreciables, del orden del 15% como máximo, así como algunas rocas muy fracturadas o alteradas, siempre que el producto de su alteración no sea arcilloso y dé al conjunto cohesión apreciable e impermeabilidad.

Los datos necesarios para el estudio de Estados Límite Últimos de pilotajes en suelos granulares son, además de la descripción de su naturaleza (ensayos de identificación) y densidad, alguno de los siguientes relativos a su resistencia.

- ◆ Ángulo de rozamiento.
- ◆ Resistencia en el ensayo SPT.
- ◆ Resistencia en ensayos penetrométricos estáticos o dinámicos continuos.
- ◆ Otros ensayos que definan la resistencia al corte.

En proyectos de importancia será conveniente obtener esta información de la resistencia del terreno por más de un procedimiento.

Además, para realizar los estudios de movimientos, normalmente asociados a los Estados Límite de Servicio, es preciso conocer la deformabilidad de los suelos granulares. El módulo de deformación de los suelos granulares suele ser creciente con la profundidad y, por eso, su definición no suele hacerse con un sólo número, sino con un gráfico de variación del módulo con la profundidad.

Es clásico, en el estudio de deformaciones horizontales de pilotes, definir la deformabilidad de los suelos granulares mediante un módulo de reacción, que se suele denominar " n_h ", del que se habla en el apartado 3.6.9.2.

c. Suelos cohesivos

Se entiende aquí, en el estudio de cimentaciones pilotadas, como suelos cohesivos aquellos terrenos que tienen cohesión, siempre que su resistencia a compresión simple sea inferior a 1 MPa y que sean suficientemente impermeables como para no ser clasificables como granulares.

Para el estudio de cimentaciones pilotadas que interesen suelos cohesivos es preciso conocer, además de su naturaleza (ensayos de identificación) y de su densidad, algún dato de su resistencia, tanto a corto plazo (o resistencia al corte sin drenaje) como a largo plazo (o resistencia al corte con drenaje), así como algún dato de su deformabilidad.

Los procedimientos de reconocimiento y caracterización de estos suelos están descritos en la Parte 2 de estas Recomendaciones.

3.6.1.2 Tipos de pilote

Los pilotes pueden clasificarse con diversos criterios según el aspecto que interese. A efectos de las recomendaciones que siguen conviene distinguir los pilotes, según el procedimiento de ejecución, en dos tipos:

- a. Pilotes hincados. También denominados pilotes de desplazamiento. La característica fundamental estriba en la compactación de los suelos del entorno que su ejecución puede inducir, ya que el pilote se introduce sin hacer excavaciones previas que faciliten su alojamiento en el terreno.
- b. Pilotes excavados o perforados hormigonados in situ. Son aquéllos que se construyen en excavaciones previas realizadas en el terreno.

Pueden existir pilotes de carácter intermedio entre los dos anteriores, tales como los hincados en preexcavaciones parciales de menor tamaño que el pilote. Así deben considerarse también los pilotes hincados con ayuda de lanzas de agua (para atravesar ciertas capas más resistentes).

También se distinguirán, en estas Recomendaciones, los pilotes de hormigón de los pilotes metálicos y de los pilotes de madera, ya que el rozamiento de las tierras con estos materiales puede ser diferente.

Las distinciones en cuanto a la estructura interna del pilote, tales como el hormigón armado frente al pretensado o los de estructura mixta hormigón-perfiles de acero o los pilotes metálicos tubulares rellenos de hormigón, aunque tienen una importancia decisiva a la hora de evaluar su resistencia estructural, tienen una importancia secundaria desde el punto de vista geotécnico.

La forma de los pilotes (circulares, anulares, tubulares, cuadrados, perfiles en H, etc.) tiene cierta importancia en cuanto al procedimiento de evaluación de su capacidad portante. En particular, es de importancia la forma de la punta en los pilotes hincados (azuches) cuando la hinca se lleva hasta entrar en roca o en un estrato resistente.

3.6.2 Modos de fallo más usuales

3.6.2.1 Estados Límite Últimos

3.6.2.1.1 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS DE TIPO GEOTÉCNICO (GEO)

Dentro de los Estados Límite Últimos de tipo geotécnico (GEO) que pueden darse en las cimentaciones profundas, deben considerarse los modos de fallo que se indican a continuación.

a. Hundimiento

Es el estado de rotura más clásico. La carga vertical sobre la cabeza del pilote superaría la resistencia del terreno y se producirían asentamientos desproporcionados.

Sobre los procedimientos de verificación de la seguridad frente al hundimiento se hacen recomendaciones en el apartado 3.6.6.

b. Rotura por arranque

Los pilotes pueden utilizarse para soportar cargas de tracción en su cabeza. Si esa carga excede la resistencia al arranque, el pilote se desconecta del terreno, rompiendo su unión y produciéndose el consiguiente fallo.

Este tipo de mecanismo y su procedimiento de evaluación se consideran en el apartado 3.6.7.

c. Rotura del terreno por cargas transversales

Cuando las cargas horizontales aplicadas en los pilotes producen en el terreno tensiones que éste no puede soportar, se producen deformaciones excesivas o incluso, si el pilote es suficientemente resistente como estructura, el vuelco del mismo.

La carga horizontal límite que pueden soportar pilotes o grupos de pilotes se considera en el apartado 3.6.8.

d. Estabilidad global

El conjunto de la estructura y su cimentación pilotada pueden fallar mediante un mecanismo de rotura aún más profundo que la cimentación o que, no siendo tan profundo, pudiera cortar los pilotes por su fuste.

Este tipo de roturas habrá de analizarse mediante los métodos de equilibrio límite descritos para la estabilidad de taludes en el punto 3.8.

3.6.2.1.2 ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS DE TIPO ESTRUCTURAL (STR)

Dentro de los Estados Límite Últimos de tipo estructural (STR), esta ROM indica procedimientos adecuados para realizar parte del estudio del siguiente modo de fallo:

a. Capacidad estructural del pilote

Las cargas transmitidas al pilotaje en su cabeza inducen esfuerzos en los pilotes que pueden dañar su estructura.

En el apartado 3.6.10 de estas Recomendaciones se indican criterios sobre los procedimientos de cálculo de esfuerzos en los pilotes.

Los criterios de verificación de la capacidad estructural de los pilotes deben ser iguales que los de otros elementos estructurales, teniendo presente los distintos materiales y las distintas formas de ejecución, que se puedan utilizar en cada proyecto particular.

b. Otros modos de fallo estructurales

Aunque no se mencionan en esta Recomendación, por considerar que el tema se sale ya fuera de su alcance, ha de mencionarse que el análisis estructural del pilote es esencial. Deben considerarse los esfuerzos de manipulación, transporte e hinca en los pilotes prefabricados hincados. Es esencial también el estudio del pandeo. Y son tarea esencial del proyecto estructural los estudios de los encepados y tableros a los que se une el pilote, particularmente el estudio del comportamiento de las uniones pilote-estructura.

3.6.2.2 Estados Límite de Servicio

Los Estados Límite de Servicio en las cimentaciones profundas están normalmente asociados a los movimientos. En ese sentido, son aplicables las ideas indicadas en 3.5.2.2 respecto a las cimentaciones superficiales.

Tanto en el proyecto de pilotes aislados como en el de grupos de pilotes deben realizarse comprobaciones en las que entra en juego no sólo la resistencia del terreno, sino también su deformabilidad.

En los grupos de pilotes se plantea, además, un problema adicional relativo a la distribución de cargas sobre los pilotes individuales. Como quiera que este aspecto está íntimamente ligado a la deformabilidad del suelo y aunque el asunto sea de carácter más general, este problema se considera dentro de este conjunto de temas que se ha agrupado bajo el epígrafe de Estados Límite de Servicio.

Finalmente, en este mismo conjunto de temas se dan recomendaciones para estimar los esfuerzos que actúan en la parte enterrada de los pilotes, en función de los esfuerzos actuantes al nivel del terreno y de la deformabilidad del mismo.

En esta ROM no se considera, por ser ya de marcado carácter estructural y específico de cada tipo de obra, el estudio de la fisuración de hormigones de los pilotes. Tampoco se dan recomendaciones específicas sobre el comportamiento dinámico (interacción dinámica suelo-estructura) de estructuras pilotadas.

3.6.2.2.1 OTRAS FORMAS DE FALLO DE LAS CIMENTACIONES PROFUNDAS

Existen otros modos de fallo, correspondientes a Estados Límite de Servicio, que, aún siendo menos frecuentes, deberán considerarse oportunamente en los proyectos y obras en las que tales problemas sean previsibles. Entre esos modos de fallo y sin pretender hacer una relación exhaustiva, se citan las siguientes:

Fallos geotécnicos o deformaciones excesivas producidos por cambios en la geometría del terreno o de la obra, como erosiones o socavaciones.

Daños en cimientos y estructuras ocasionados por vibraciones excesivas debido a la hinca de pilotes. La hinca de pilotes en suelos arcillosos blandos ha originado y puede originar daños importantes en zonas incluso lejanas (más de cien metros) del lugar de hinca.

Pérdidas de durabilidad por ataques del medio ambiente al material del pilote, con la consiguiente merma de capacidad. Aunque también se deterioran el hormigón y la madera, merece mención especial el efecto de la corrosión del acero en las zonas batidas por el oleaje, la carrera de marea o por las oscilaciones del nivel freático.

3.6.3 Definición de los factores de proyecto

3.6.3.1 Configuración geométrica

Los datos geométricos ⁽¹¹⁾ de más interés para analizar el comportamiento de un pilote aislado son la longitud dentro del terreno y su diámetro (o sus diámetros si es que éste no fuera constante).

En los grupos de pilotes será necesario conocer su número y su distribución. Se hará mención de la separación entre pilotes “s” como parámetro más indicativo.

La configuración geométrica del subsuelo debe conocerse en toda la profundidad atravesada por los pilotes y también por debajo del nivel de sus puntas. En un pilote individual los efectos de las cargas pueden profundizar bajo la punta poco más allá de cinco veces el diámetro del pilote, pero en el caso de grupos de pilotes esos efectos pueden ser notables hasta profundidades bajo sus puntas de más de vez y media el ancho del grupo medido en planta.

En la descripción de los apartados siguientes se hablará, en general, de diámetro del pilote. En pilotes no circulares debe entenderse esa dimensión como el diámetro del pilote circular de igual perímetro externo o de igual sección transversal, según sea el motivo que obligue a hacer esa equivalencia.

Como caso especial, deben considerarse los pilotes de sección rectangular alargada que suelen realizarse con maquinaria de ejecución de pantallas continuas de hormigón armado, que son de uso relativamente frecuente.

En estos casos y para comprobar la seguridad frente al hundimiento, la punta puede suponerse con un área equivalente para secciones rectas alargadas, $B \times L$, dada por la siguiente expresión:

Área de la punta equivalente

$$A_p = 0,6 BL + 0,4 B^2$$

siendo “L” la mayor dimensión de la sección recta.

En forma similar pueden tratarse los elementos portantes formados por tablestacas metálicas. La sección transversal de la punta, a efectos del cálculo de la capacidad resistente frente al hundimiento, puede considerarse rectangular y con un ancho igual a la distancia horizontal que existe entre los planos verticales que inscriben al tablestacado.

El contorno lateral que debe considerarse para formas no circulares es el correspondiente al polígono de menor longitud de contorno capaz de inscribir la sección recta del pilote.

Algunas de las notaciones que se utilizarán más adelante relativas a la configuración geométrica se ilustran en la Fig. 3.6.2.

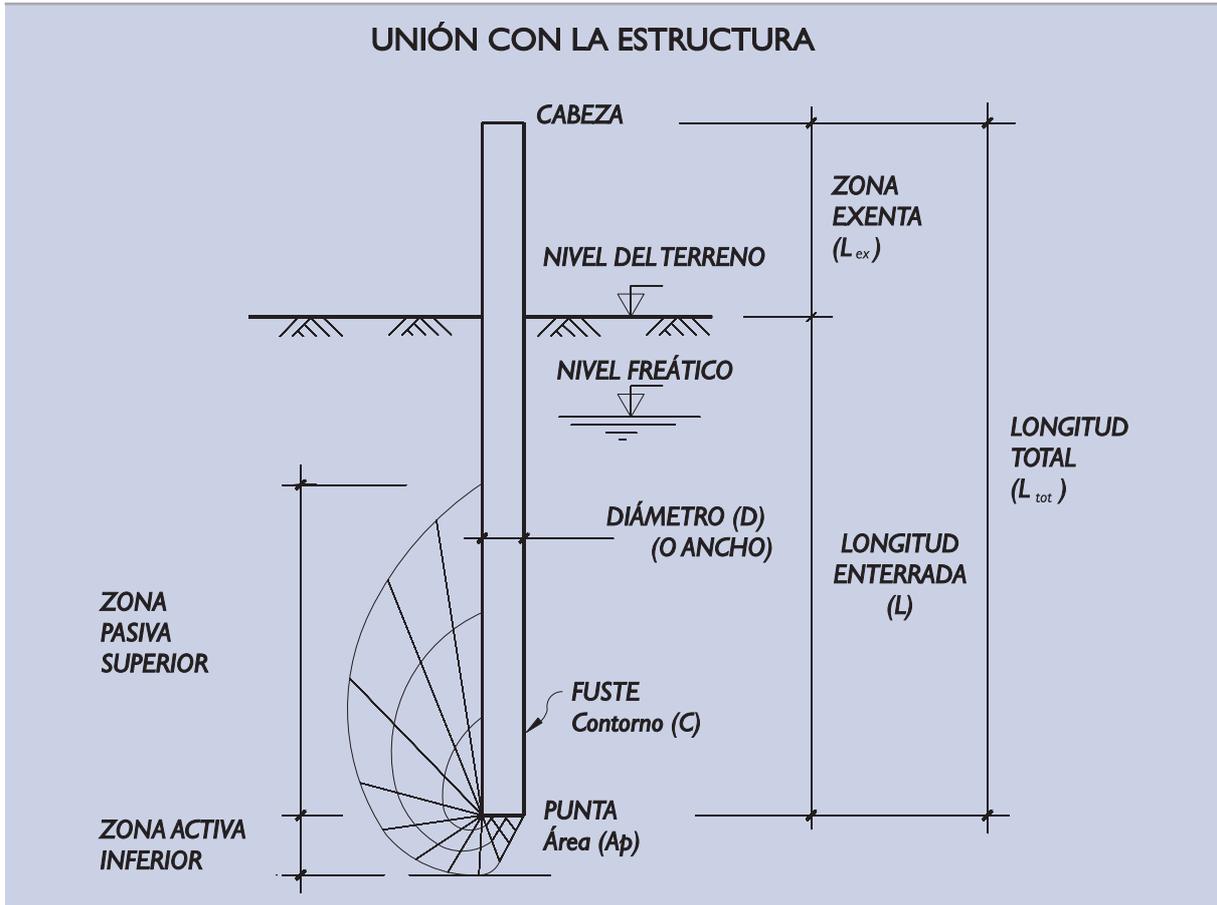
En esta figura se indican dos zonas, denominadas activa y pasiva, cerca de la punta del pilote. En esas zonas es donde se rompe el terreno, donde se alcanza la condición de fluencia plástica, durante el proceso de hundimiento vertical. La amplitud de estas zonas depende principalmente del ángulo de rozamiento del terreno. A efectos de cálculo, cuando sea necesario, se supondrá que:

- ◆ La zona activa inferior afecta hasta una profundidad bajo la punta del pilote igual a:
 - 2D – terrenos cohesivos.
 - 3D – terrenos granulares y rocas.

(11) Dadas las condiciones de ejecución pueden existir desviaciones geométricas importantes que habrán de limitarse (tolerancias) y considerarse en los cálculos de proyecto.

- ◆ La zona pasiva superior afecta hasta una altura sobre la punta del pilote igual a:
 $4D$ – terrenos cohesivos.
 $6D$ – terrenos granulares y rocas.

Figura 3.6.2. Algunas notaciones relativas al pilote aislado



3.6.3.2 Características del terreno

Las características del terreno serán descritas mediante parámetros de cálculo que serán los deducidos de los ensayos correspondientes. Dependiendo del tipo de terreno serán necesarias unas u otras características, tal como se indicará en cada caso.

Los valores de los parámetros resistentes deben ser la mejor estimación del valor medio. Para calcular según el método de Nivel I que se describe en esta ROM, no se deben utilizar coeficientes de seguridad parciales para mayorarlos o minorarlos. En cualquier caso se atenderán las ideas expuestas en 3.3.5.2.

3.6.3.3 Acciones

Cada situación de proyecto estará encaminada a verificar la seguridad frente a un modo de fallo no deseado. Esa situación quedará definida por unos datos geométricos, unas características del terreno, comentadas en los apartados anteriores, y unas combinaciones de acciones que se comentan a continuación.

En la evaluación de las acciones se tendrán en cuenta las recomendaciones indicadas en 3.3.5.3.

Para analizar el estado límite de hundimiento se considerarán las combinaciones de carga que producen la mayor componente vertical o axial, en general.

Para analizar el modo de fallo de rotura del terreno por empuje horizontal se considerarán las combinaciones de carga que produzcan la máxima componente horizontal y/o mayor momento.

Si existieran pilotes en tracción, para evaluar la seguridad frente al arranque, se utilizará la combinación de acciones que produzcan las máximas tracciones.

En el estudio de los esfuerzos en los pilotes, así como en los estudios de interacción cimiento-estructura se utilizarán cuantas combinaciones sean necesarias para verificar la capacidad estructural del cimiento y de la estructura.

3.6.3.4 Efectos parásitos

Los pilotes, debido a su interacción con el terreno, pueden quedar sometidos a unas acciones que habrán de sumarse a las que produce la propia estructura a la que sustentan. Estas acciones se denominan aquí efectos parásitos.

Los efectos parásitos que suelen ocurrir con mayor frecuencia son los que se citan en este apartado. El ingeniero debe considerar su posible ocurrencia en la obra en cuestión y, si procede, evaluar su importancia siguiendo las recomendaciones que aquí se indican.

3.6.3.4.1 ROZAMIENTO NEGATIVO

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La situación de rozamiento negativo se produce cuando el asiento general de la superficie del terreno es mayor que el asiento de la cabeza del pilote. En esa situación, el pilote soporta, además de la carga que le transmite la estructura, parte del peso del terreno. Como consecuencia, el rozamiento negativo hace que la carga total de compresión que el pilote ha de soportar aumente.

El asiento del terreno puede ser debido a su peso propio (terrenos en fase de consolidación) o, más frecuentemente, por causa de cargas colocadas en superficie (rellenos) después de construir el pilote o colocadas antes, pero estando aún el proceso de consolidación en marcha. Puede ser también debido a rebajamientos del nivel freático. Las vibraciones y los sismos pueden inducir asientos que provoquen rozamiento negativo.

La identificación del problema puede realizarse mediante un cálculo previo de los asientos del terreno y del pilote y comparando ambos. En general, es suficiente una pequeña diferencia de asientos para que se produzca la situación de rozamiento negativo; según la experiencia publicada, basta con asientos diferenciales del orden de 1 cm para que el rozamiento negativo se desarrolle notablemente.

CÁLCULO DEL ROZAMIENTO NEGATIVO

El rozamiento negativo unitario (fuerza por unidad de superficie) se debe suponer igual a la resistencia por fuste, según se indica en 3.6.4.

Existen soluciones técnicas (tratamiento con betunes del fuste de pilotes hincados) que reducen notablemente el rozamiento negativo. Si se utiliza alguna de esas técnicas, deberá estimarse el valor del rozamiento negativo unitario correspondiente.

El esfuerzo tangencial, que se designará con la variable R^- , es el resultado de integrar el valor del rozamiento negativo unitario, que se denominará τ^- , a lo largo del contorno del pilote y en una profundidad que va, desde la cabeza del pilote, hasta una profundidad "x", que habrá que estimar. La expresión matemática de esta idea es la siguiente:

$$R^- = \int_0^x \pi D \tau^- dz$$

donde D es el diámetro del pilote equivalente (igual contorno).

Para pilotes que atraviesen suelos blandos y después apoyen sobre roca, se supondrá que "x" es igual que la profundidad del sustrato rocoso medida desde la cabeza del pilote.

Para pilotes flotantes que puedan sufrir asientos de cierta importancia y que sólo en contadas ocasiones se utilizan en terrenos que puedan sufrir rozamiento negativo, se puede estimar un valor de "x" menor que la longitud de pilote mediante el procedimiento simplificado que se describe a continuación.

En primer lugar debe realizarse un cálculo de asientos general de la zona, suponiendo que no existen pilotes. Ese cálculo debe incluir no sólo la determinación del asiento en la superficie sino también a cualquier profundidad. Es bueno obtener varios puntos de la ley de asientos en profundidad. Es la curva 1 que se indica en la Fig. 3.6.3.

En segundo lugar se examinará el asiento del pilote (o del grupo de pilotes, en su caso). Para ello se puede suponer que los pilotes son rígidos y que su asiento viene dado por un valor, s_p , que depende del valor del rozamiento negativo. Cuanto mayor sea la profundidad hasta la que se suponga que actúa el rozamiento negativo mayor será la carga que se transmite al terreno inferior ($Q + W + R^-$) y menor será la amplitud de la zona de sustentación. Como consecuencia, el asiento del pilote (o del grupo, en su caso) es una función claramente creciente con la profundidad "x" hasta donde se suponga que actúa el rozamiento negativo. Es la curva 2 que se indica en la Fig. 3.6.3.

Realizados estos cálculos, se debe tomar como profundidad "x" aquella que conduce a asientos del pilote similares a los que sufriría el terreno a esa misma profundidad cuando no existen pilotes. Es la ordenada de la intersección de las curvas 1 y 2 que se indica en la Fig. 3.6.3.

Para realizar los cálculos de asientos deberá elegirse algún procedimiento adecuado de los que se indican en esta ROM o de aquéllos que queden avalados por la experiencia para situaciones similares.

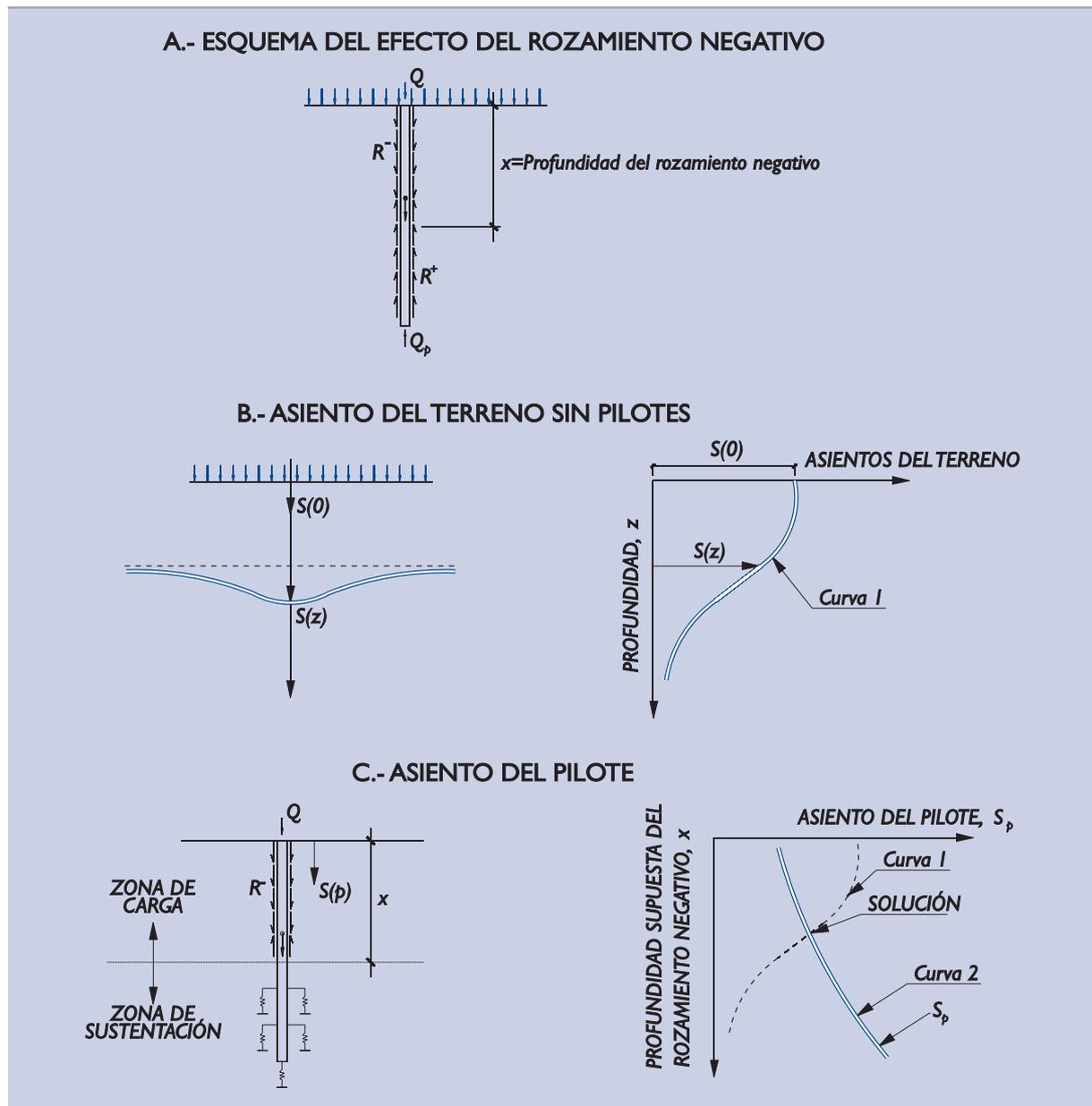
Para cada carga de servicio Q existe un rozamiento negativo. Siempre es conservador estimarlo para una carga de servicio baja y aplicarlo después para cualquier otra situación.

EFFECTO GRUPO EN EL ROZAMIENTO NEGATIVO

Los pilotes exteriores de los grupos de pilotes deben considerarse sometidos al mismo rozamiento negativo que si estuviesen aislados, especialmente los de las esquinas.

En los pilotes interiores es posible que el rozamiento negativo calculado como pilote individual y siguiendo las recomendaciones antedichas resulte superior al peso de las tierras que los rodean. Por ese motivo, en el caso de grupos de pilotes densos o poco espaciados, se debe comprobar que la suma de rozamientos negativos de los pilotes internos no supera el peso de tierras interior al grupo y situada por encima del nivel de cambio de signo del rozamiento. De otra forma, se tomará, como estimación de rozamiento negativo total, un valor menor: igual al peso de esas tierras.

Figura 3.6.3. Esquema de cálculo del rozamiento negativo



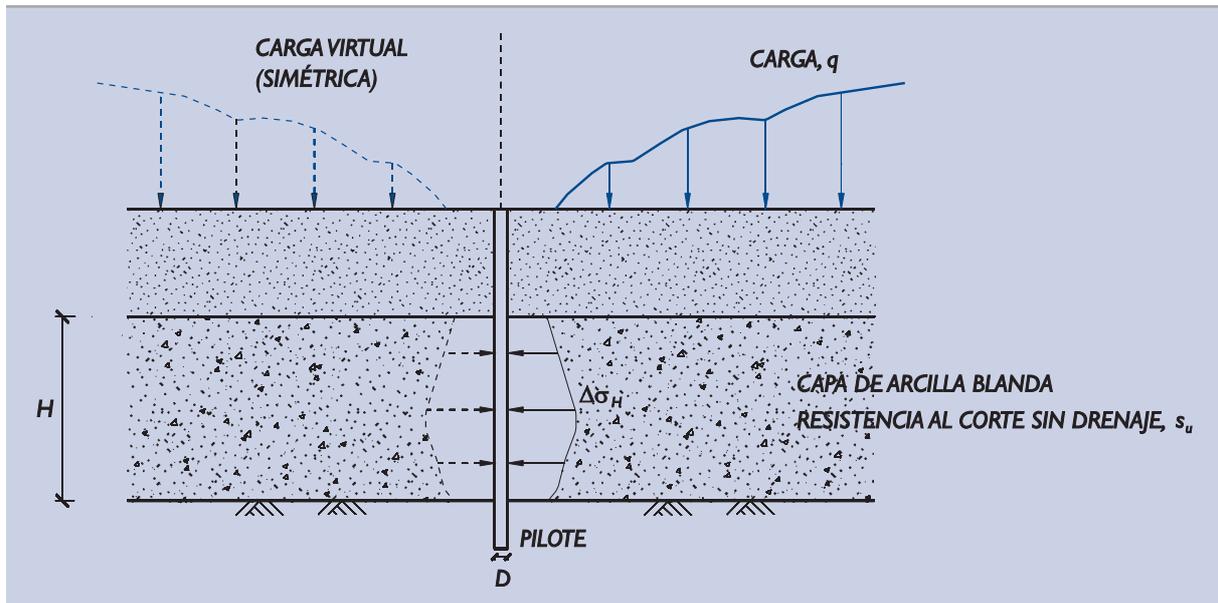
3.6.3.4.2 EMPUJES HORIZONTALES CAUSADOS POR SOBRECARGAS VERTICALES DE SUPERFICIE

Las cargas colocadas en superficie producen desplazamientos horizontales del terreno que pueden afectar negativamente a cimentaciones pilotadas próximas cuando existen suelos blandos en profundidad. En la Fig. 3.6.4 se indica esquemáticamente una situación típica.

Los pilotes ejecutados en taludes pueden estar sometidos también a cargas horizontales importantes. Este segundo problema se considera en el apartado siguiente.

Normalmente, no será necesario considerar este efecto cuando la resistencia al corte sin drenaje del suelo sea superior al valor siguiente:

Figura 3.6.4. Esfuerzos horizontales. Sobrecargas sobre terrenos blandos



$$s_u \geq q \cdot \frac{D \cdot H}{a}$$

donde:

- q = presión vertical aplicada en superficie.
- D = diámetro del pilote.
- H = espesor del suelo blando.
- a = 5 m² (valor aproximado).

El estudio de estos problemas requiere un análisis de interacción terreno-pilote, que será necesario realizar con tanto más detalle cuanto más crítico resulte el problema. A falta de esos estudios, se podrá seguir el método simplificado que se indica a continuación.

El empuje horizontal máximo que puede provocar una carga de superficie puede estimarse de manera aproximada cuando el subsuelo es muy deformable y los pilotes están próximos entre sí, formando una "barrera" que impediría totalmente el movimiento horizontal del terreno.

Cuando no se requiera una gran precisión en la estimación de esfuerzos en los pilotes, se puede adoptar el método de cálculo que se ilustra en el croquis de la Fig. 3.6.4. El método se basa en las siguientes hipótesis simplificativas que, en general, conducen a una sobre-estimación del empuje horizontal:

- ◆ El pilotaje soporta, a modo de barrera horizontal rígida, todo el empuje horizontal generado por la carga a cada profundidad z y en un ancho "B" igual al menor de los siguientes:
 - a) el ancho de la zona cargada.
 - b) el ancho del grupo de pilotes más tres veces el diámetro de un pilote.
 - c) tres veces el diámetro del pilote multiplicado por el número de pilotes de la primera fila del grupo, la más próxima a la carga.
- ◆ La presión horizontal generada a una profundidad z bajo el terreno se puede calcular con la teoría de la elasticidad suponiendo que el terreno es homogéneo e isótropo.

En esas condiciones, es posible calcular el empuje horizontal descompensado que corresponde a una deformación nula, que ocurriría cuando el pilotaje es mucho menos deformable que el terreno.

Para simular la condición de barrera rígida horizontal, se debe suponer que actúa, además de la carga real, una carga virtual simétrica a la real respecto al eje de la primera fila del pilotaje en estudio. Con esa doble carga, el plano de simetría no sufriría deformación y estaría sometido, a uno y otro lado, al mismo incremento de presión horizontal, $\Delta\sigma_H$. El empuje sobre la barrera supuesta sería precisamente el provocado por esa presión horizontal (necesaria para que no exista deformación), ya que el terreno ubicado al otro lado de la barrera, que se supone muy deformable, no colaboraría en la contención del empuje horizontal.

El empuje total se puede obtener integrando las presiones horizontales en toda la altura del estrato blando y en la anchura B.

Existe un límite superior del empuje unitario, $\Delta\sigma_H$, que es precisamente el valor de la carga de rotura del terreno, que puede estimarse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta\sigma_H = 1/2 \sigma'_V + 2 s_u$$

donde:

σ'_V = presión vertical efectiva a largo plazo, después de colocar la sobrecarga.

s_u = resistencia al corte sin drenaje del suelo blando.

Comentario: El estado tensional inicial, antes de colocar la sobrecarga de tierras a un lado de la cimentación, puede considerarse representado por las tensiones:

σ'_V = presión vertical efectiva.

σ'_H = presión horizontal efectiva = $K_0 \sigma'_V$

Después de aplicada la carga, a un lado de la pantalla de pilotes habrá un incremento de presión horizontal $\Delta\sigma_H$ mientras que el incremento de presión vertical puede resultar pequeño y suponerse que $\Delta\sigma_V = 0$. El desviador de tensiones (diferencia de tensiones principales) termina teniendo el valor siguiente:

$$\sigma_H - \sigma_V = \Delta\sigma_H - (1 - K_0) \sigma'_V$$

imponiendo la condición de rotura:

$$\sigma_H - \sigma_V = 2 s_u$$

se obtiene:

$$\Delta\sigma_H = (1 - K_0) \sigma'_V + 2 s_u$$

Finalmente, suponiendo el valor aproximado de $K_0 = 1/2$, resulta la expresión, también aproximada, que se indica en el texto.

3.6.3.4.3 EMPUJES SOBRE PILOTES EN TALUD

La construcción de muelles claraboya, en los que un tablero queda sustentado mediante pilotes, es un ejemplo claro de este tipo de problema. El movimiento horizontal del talud de derrame de tierras supone siempre un empuje horizontal parásito que conviene considerar.

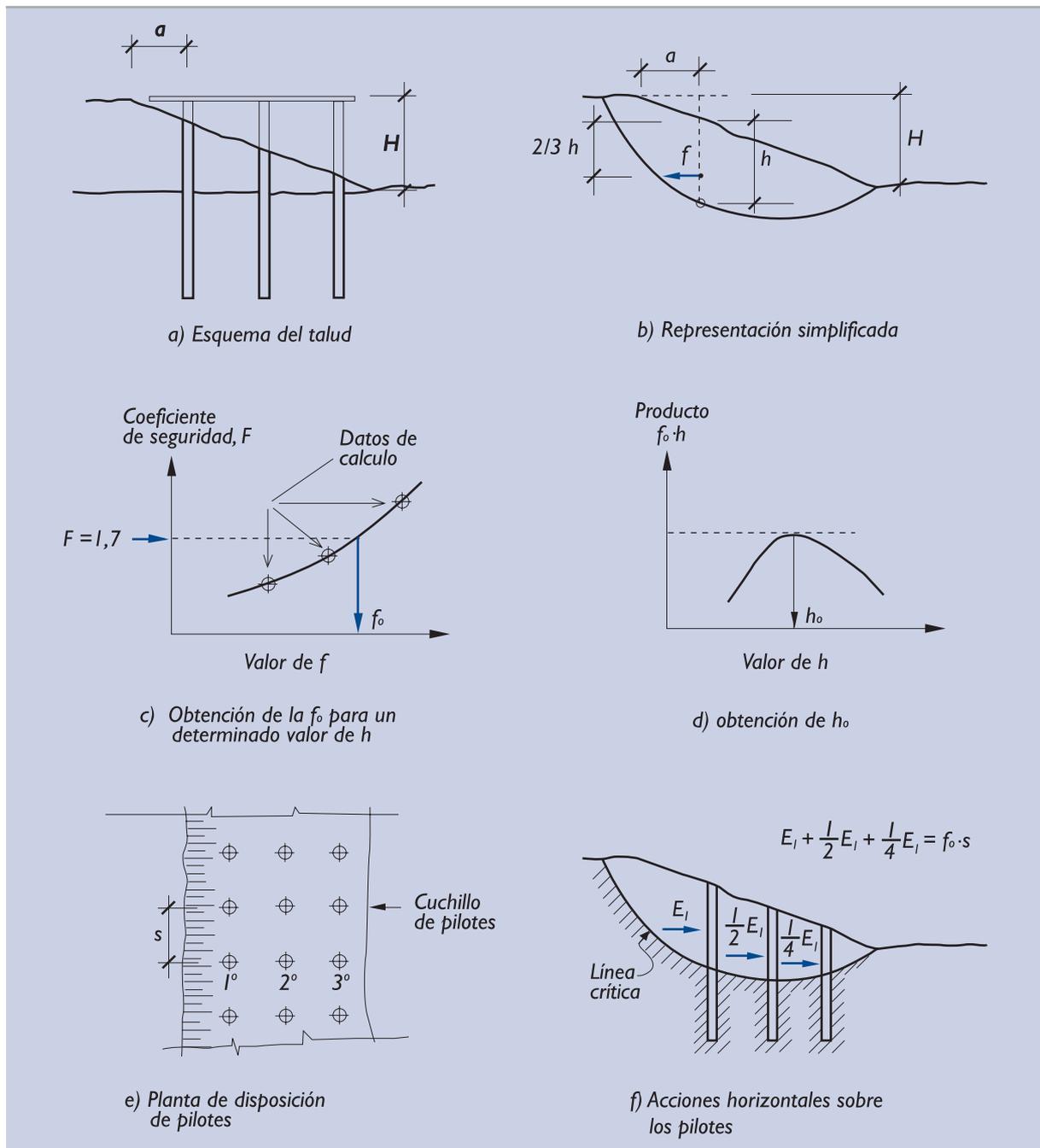
El problema se puede paliar notablemente cuando se ejecutan los pilotes «a posteriori» después de crear el talud de derrame, pero esa técnica puede ser excesivamente costosa.

Cuando se ejecutan pilotes hincados y después se rellena entre ellos para conseguir la configuración final, es siempre aconsejable colocar el relleno por tongadas horizontales.

Generalmente, el problema es de tal interés que conviene analizarlo de forma específica mediante un modelo numérico del caso en cuestión y, además, consultar la bibliografía que pueda describir casos semejantes en los que se haya observado el comportamiento.

En aquellos casos en los que sólo se quiera obtener una primera aproximación del empuje que actúa sobre los pilotes, se puede proceder de acuerdo con el método sencillo que se describe a continuación. Ver Fig. 3.6.5.

Figura 3.6.5. Procedimientos de estimación de empujes sobre pilotes en talud



El cálculo simplificado requiere el uso de un programa de ordenador para el análisis de problemas de estabilidad de taludes que permita introducir, como acción, una fuerza horizontal interna, dentro de la masa deslizante.

El efecto del conjunto de todos los pilotes se representará por una sola fuerza horizontal interna, f , que será aplicada en la vertical del eje de los pilotes más próximos a la cabeza del talud y a una profundidad $2/3h$ respecto a la cabeza del talud, siendo h la profundidad de la línea de deslizamiento en esa misma vertical. Esto requerirá especificar en el cálculo que las líneas de deslizamiento pasen por un determinado punto fijo.

El cálculo se repetirá, conservando el valor de h pero cambiando el valor de f para obtener el valor que correspondería a un coeficiente de seguridad igual a 1,7. Este valor se definirá como f_0 .

El proceso se repetirá para distintos valores de h , al objeto de estimar el valor máximo del producto $f_0 \cdot h$. La línea de rotura correspondiente y los valores asociados de f_0 y h_0 serán utilizados después para determinar el empuje sobre el conjunto de todos los pilotes y su punto de aplicación.

El empuje sobre el conjunto de todos los pilotes de un cuchillo (conjunto de pilotes en una misma sección transversal) será:

$$E_{\text{total}} = s \cdot f_0$$

siendo s la separación entre cuchillos de pilotes. Si esa separación es mayor que la altura del talud, H , se tomará este valor como valor de la separación de cálculo.

El empuje total sobre los pilotes de un cuchillo se distribuirá entre ellos de manera ponderada. Al pilote primero, el más próximo a la cabeza del talud, se le asignará doble carga que al segundo y a éste doble que al tercero y así sucesivamente.

El punto de aplicación de la carga se supondrá a $2/3$ de la profundidad enterrada del pilote dentro de la masa deslizante de la línea de rotura crítica, la que haya conducido a la determinación de f_0 y h_0 .

Existen programas de ordenador comerciales que permiten representar la presencia de pilotes en un talud con otros procedimientos. El procedimiento aproximado que se acaba de describir puede adaptarse al programa. En todo caso, se debe obtener la fuerza que actuaría sobre los pilotes en el supuesto de que los parámetros resistentes del terreno (c y $\text{tg } \phi$) fuesen 1,7 veces menores que los reales y se quisiera mantener, en esas condiciones, el equilibrio estricto. Las fuerzas que actuarían sobre los pilotes en esas circunstancias son las que aquí se recomienda considerar como estimación de los empujes del talud sobre los pilotes.

A efectos del cálculo estructural, el empuje que actúa sobre cada pilote puede suponerse repartido de manera linealmente creciente con la profundidad, en la altura que va desde su cabeza hasta la intersección con la línea de deslizamiento crítica.

3.6.3.5 Efectos de las cargas cíclicas o alternativas

DEGRADACIÓN DE LA RESISTENCIA POR FUSTE

La experiencia limitada que existe del comportamiento de pilotes sometidos a una compresión cíclica en su cabeza indica que cuando se llega a producir un cambio de signo de la acción, compresión y tracción alternativas, se puede producir un cambio significativo en la capacidad de carga del pilote, mientras que las cargas cíclicas que mantienen permanentemente el pilote en compresión parecen tener un efecto menos significativo.

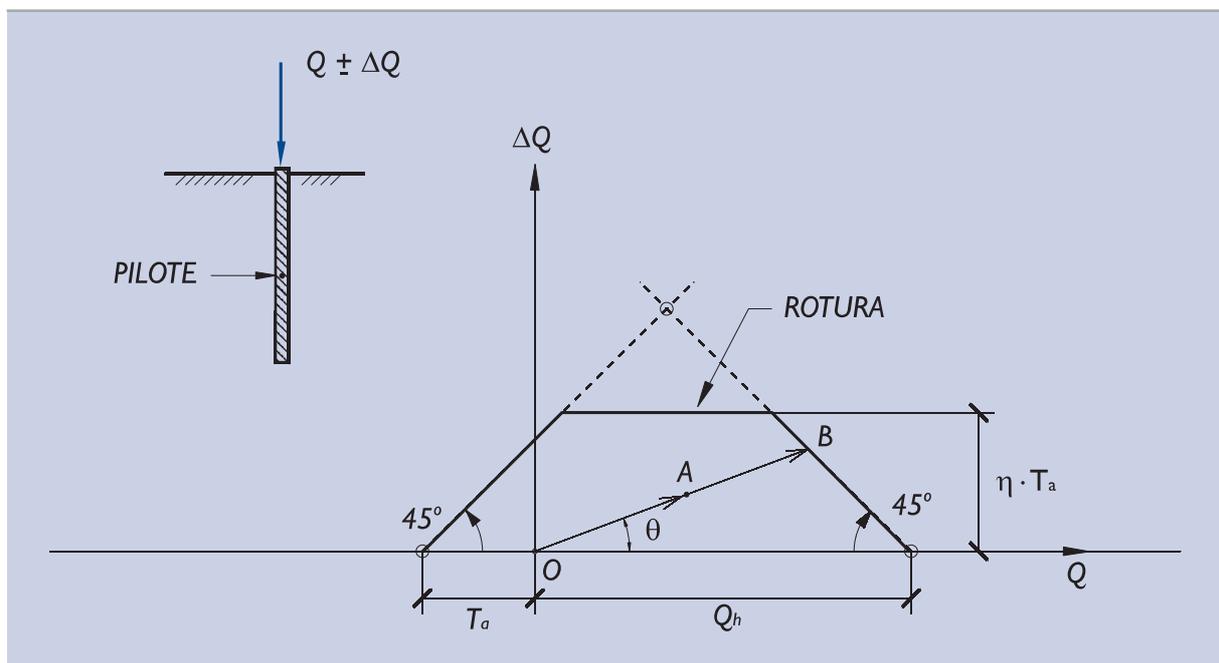
La experiencia indica también que en los pilotes que trabajan permanentemente en tracción la resistencia por fuste máxima movilizable es menor que la correspondiente en compresión. Este hecho ya ha sido tenido en cuenta en el apartado 3.6.7 al hablar de la carga de arranque o extracción de un pilote. En esos casos, la resistencia por fuste que se considera es la mitad de la correspondiente a compresión.

Para tener en cuenta el efecto desfavorable del cambio compresión-tracción se puede suponer que, cuando se produce alguna tracción en la cabeza del pilote, ya es de aplicación la mencionada reducción al valor mitad de la mencionada resistencia por fuste.

En pilotes trabajando permanentemente en tracción parece que el efecto cíclico tampoco merece mayores reducciones, una vez que se ha considerado que el sentido del tiro (arranque) es desfavorable al reducir la correspondiente resistencia por ese efecto.

Con estas ideas ⁽¹²⁾ se ha preparado el gráfico de comprobación que se recoge en la Fig. 3.6.6 que permite calcular el coeficiente de seguridad frente al hundimiento y/o arranque en caso de carga cíclica.

Figura 3.6.6. Evaluación de la seguridad de un pilote con carga axial cíclica



A = punto representativo de las acciones sobre el pilote en una sección al nivel del terreno

$$\text{Coeficiente de seguridad, } F = \frac{\overline{OB}}{\overline{OA}}$$

La línea que se indica como «rotura» separa la región segura de la insegura. El cálculo del coeficiente de seguridad correspondiente a una acción determinada, punto A del diagrama, se puede calcular como se indica en dicha figura.

La frontera de la rotura se puede construir con los valores de Q_h (carga de hundimiento estática, ver apartados 3.6.4 y 3.6.5) y T_a (resistencia al arranque, también en condiciones estáticas, apartado 3.6.7). El valor de η que conviene utilizar para calcular la ordenada del tramo horizontal de la frontera del fallo vendría dado por:

$$\eta = \frac{1}{2} + \alpha - \beta(1 + \alpha) \geq 1 - \beta$$

(12) Más detalle puede encontrarse en H.G. Poulos "Marine Geotechnics". Chapman and Hall. 1988

donde:

α = relación entre la resistencia por punta y por fuste en el hundimiento en condiciones estáticas;

$$\alpha = \frac{R_p}{R_f}$$

Los valores de R_p y R_f se calcularán de acuerdo a lo establecido en 3.6.4.

β = relación que existe entre el peso efectivo enterrado del pilote y la resistencia al arranque;

$$\beta = \frac{W'}{T_a}$$

El cálculo de T_a se hará como se indica en 3.6.7.

Cuando el eje del pilote no sea vertical y esté desviado respecto a la vertical un cierto ángulo, el peso efectivo a utilizar en los cálculos será el valor real multiplicado por el coseno de dicho ángulo.

El valor de η se ha obtenido de forma que, cuando ya se produzca en algún ciclo el cambio de signo de la carga que actúa en cabeza la resistencia por fuste, sea también reducida a la mitad aun en el caso de rotura a compresión. Los diagramas de interacción (líneas que marcan la frontera de rotura) que se han podido obtener con modelos numéricos indican que el "techo" de estas fronteras es curvo, pero existe una amplia zona central donde la condición $\Delta Q = \text{cte}$ está bastante próxima a los resultados.

Este diagrama indica tres regiones (quebrós de la frontera de rotura) donde la comprobación de la seguridad puede aproximarse de manera diferente, tal como se indica a continuación:

1. Compresión alta

Esta situación ocurre cuando:

$$\Delta Q < \eta \frac{T_a}{Q_h - \eta T_a} \cdot Q$$

En este caso no es necesario considerar el carácter cíclico de la acción. Basta con comprobar que ante la compresión máxima $Q + \Delta Q$ existe seguridad suficiente frente al hundimiento.

2. Compresión baja o tracción

Esta situación ocurre cuando:

$$Q < (\eta - 1) T_a$$

En este caso tampoco es necesario considerar el carácter cíclico o alternativo de la acción. Basta con comprobar que ante la tracción máxima $Q - \Delta Q$ se cumple la seguridad frente al arranque.

3. Situación intermedia

Cuando no se cumple ninguna de las dos condiciones anteriores el carácter alternante de la carga será dominante, y entonces el coeficiente de seguridad será:

$$F = \frac{|\Delta Q|}{\eta \cdot T_a}$$

Normalmente la carga cambiará de forma irregular y ΔQ no tendrá un valor constante. Para realizar los cálculos en esos casos, se cree adecuado tomar como valor de ΔQ la mayor desviación del valor estático correspondiente y realizar los cálculos como si se tratase de un caso de carga cíclica. No obstante, el ingeniero debe tener en cuenta la posibilidad de utilizar valores menores de ΔQ , tal como se indica en los párrafos que siguen al considerar la duración y el posible carácter impulsivo de la carga.

Lo especificado hasta aquí corresponde a un número de ciclos de carga muy grande, cuando ya se alcanza una respuesta estacionaria (algunos cientos de ciclos). Cuando el número de ciclos es claramente menor, la degradación también es menor. Para considerar este efecto, el ingeniero debe disponer de información específica.

AUMENTO DE RESISTENCIA CON LA VELOCIDAD DE CARGA

La velocidad de carga en los ensayos de rotura de laboratorio hace que la resistencia obtenida como resultado sea mayor cuanto mayor sea ésta. Los ensayos normalizados se ejecutan con velocidades de carga mucho menores que las velocidades de carga que suelen ocurrir en la práctica cuando los pilotes soportan cargas cíclicas o alternativas causadas por el oleaje. Para tener en cuenta este efecto podría considerarse una resistencia mayor o, alternativamente, una reducción adecuada de la componente alternante de la carga, en lugar del valor pico antes mencionado.

Los aumentos de resistencia con la velocidad de carga suelen ser de tipo logarítmico. Se produce un aumento de carga similar cada vez que la velocidad se multiplica por el mismo factor. Los pilotes flotantes ejecutados en terrenos no permeables (cohesivos) pueden aumentar su capacidad de carga axial entre un 10% y un 20% cada vez que se multiplica por 10 la velocidad de carga. En suelos granulares ese aumento parece en general más moderado.

El efecto de aumento de resistencia puede compensar el efecto de degradación antes indicado y, como consecuencia, el ingeniero podría obviar la consideración del carácter oscilante o alternante de la carga. Para ello debería disponer información específica relativa a su problema. De otro modo se recomienda cierta prudencia y considerar únicamente el efecto de la degradación de la resistencia por fuste indicado al principio del apartado.

AUMENTO DE LA DEFORMABILIDAD

La relación carga-movimiento en la cabeza de un pilote durante un proceso de carga cíclica o alternativa puede establecerse tal como se indica en el apartado 3.6.9 para el caso de carga estática, pero haciendo ciertas adaptaciones.

Los parámetros del terreno que han de considerarse en este caso son los indicados en el apartado 3.10.2, incluyendo el amortiguamiento correspondiente.

La degradación del terreno en el entorno del fuste del pilote hace que su deformabilidad aumente a medida que es solicitado por nuevos ciclos de carga.

El aumento de deformabilidad no es importante cuando la carga axial se mantiene bajo ciertos umbrales, tal como resulta al aplicar los coeficientes de seguridad que se indican en esta ROM. En consecuencia es recomendable, cuando no se disponga de información específica y cuando la mayor deformabilidad sea desfavorable, reducir algo los parámetros de deformación dinámica (por ejemplo, valor mitad del módulo dinámico G) para tener en cuenta la degradación de la rigidez del suelo al estimar los movimientos.

ESFUERZOS HORIZONTALES

Los esfuerzos horizontales en las cabezas de los pilotes verticales y, en general, los empujes transversales al eje del pilote son transmitidos al terreno a través de la propia estructura del pilote generando en él compresiones alternativas que, en alguna zona (parte más próxima al nivel del terreno), pueden llegar a decomprimirlo. Incluso puede perderse el contacto pilote-terreno en esa zona.

Para tener esto en cuenta, ya se especificó en el apartado 3.6.8 que se desprecie la colaboración del terreno en la zona más superficial, hasta una profundidad que en general es igual a vez y media el diámetro del pilote.

La degradación del terreno y la ganancia de resistencia debido al carácter cíclico de la acción transversal son, en el caso de carga horizontal, de menor trascendencia que en el caso de carga vertical y en consecuencia puede no tenerse en consideración en los cálculos.

La deformabilidad del terreno aumenta con la amplitud de la carga horizontal. Ese aumento es difícil de estimar pues depende de varios factores, entre ellos la rigidez relativa del pilote referida a la del propio suelo y la amplitud de las cargas.

Para las cargas usuales de servicio, la deformabilidad puede ser, después de un buen número de ciclos de carga, del orden del 10% al 100% mayor que durante el primer ciclo.

Para tener esto en cuenta, el ingeniero puede suponer dos hipótesis alternativas y complementarias de cálculo: una con la rigidez inicial del suelo y otra con el valor mitad. Utilizaría después la que sea más desfavorable.

Cuando el tema resulte de interés puede y debe recurrirse a la consulta de la bibliografía técnica. En estos casos, además, es altamente recomendable realizar ensayos de tiro horizontal (transversal, en general), que son relativamente sencillos de ejecutar.

3.6.4 La carga de hundimiento mediante fórmulas estáticas

3.6.4.1 Formulación básica

La resistencia al hundimiento de un pilote aislado se considerará, por simplificar el tratamiento, dividida en dos partes: la contribución de la punta y la contribución del fuste. De esa manera se podrá escribir:

$$Q_h + W' = Q_p + Q_f$$

Q_h = carga vertical que aplicada en la cabeza del pilote produce su hundimiento. Cuando parte del pilote quede exenta (fuera del terreno) se tomará como "cabeza", a efectos de cálculo de la carga de hundimiento, la sección horizontal al nivel del terreno.

W' = peso efectivo del pilote. Bajo el nivel freático se considerará el peso sumergido.

Q_p = parte de la carga que se supone soportada por la punta. Resistencia por punta.

Q_f = parte de la carga que se supone soportada por el contacto pilote-terreno en el fuste. Resistencia por fuste.

Las resistencias por punta y por fuste pueden calcularse mediante las siguientes expresiones:

$$Q_p = q_p \cdot A_p$$

$$Q_f = \int_0^L \tau_f \cdot C \cdot dz$$

donde:

q_p = resistencia unitaria por la punta.

A_p = área de la punta.

τ_f = resistencia unitaria por el fuste.

L = longitud del pilote dentro del terreno.

C = perímetro de la sección transversal del pilote.

z = profundidad contada desde la superficie del terreno.

Como quiera que, en general, la resistencia unitaria por fuste es variable con la profundidad, el cálculo de la resistencia por fuste normalmente requiere la integración indicada en la expresión precedente. En los casos en que la resistencia por fuste sea constante por tramos y también lo sea el contorno del pilote en cualquier sec-

ción horizontal, la resistencia por fuste tiene una expresión más sencilla; sería un sumatorio con un término por cada tramo, esto es:

$$Q_f = \sum \tau_f \cdot A_f$$

donde:

- A_f = área del contacto entre el fuste del pilote y el terreno en cada tramo.
- τ_f = resistencia unitaria por fuste en cada tramo.

Los valores de las áreas de punta y los valores de los perímetros del fuste dependen de la forma geométrica del pilote. Ver apartado 3.6.3.1.

En los pilotes huecos es posible que el tapón de terreno que se forme en la punta tenga una resistencia unitaria por punta inferior a la deducida de esa expresión. En esos casos deberá investigarse un mecanismo de fallo por movimiento del tapón de la punta contenido, únicamente, por su rozamiento lateral con el interior del pilote. En los pilotes huecos hincados es relativamente fácil comprobar la longitud de ese tapón y su evolución a medida que avanza la hinca.

La carga de hundimiento de un pilote vertical depende, pues, de un parámetro fundamental “ q_p ” que define la resistencia unitaria por punta y por una ley de variación con la profundidad de otro parámetro clave, “ τ_f ” que cuantifica la resistencia por fuste. La evaluación de estos parámetros puede hacerse por métodos muy diversos dependiendo del tipo de terreno y del tipo de pilote. Los de más frecuente uso, y cuya aplicación se recomienda, son los indicados en la Fig. 3.6.7.

La aplicación de uno o varios procedimientos para estudiar una obra concreta es una decisión que corresponde al ingeniero, teniendo en cuenta que algunos métodos son específicos de algunos tipos de suelo y que no pueden aplicarse más que en esas situaciones.

Por otro lado, existen procedimientos basados en fórmulas dinámicas, que se describirán en el apartado 3.6.5, que pueden utilizarse simultáneamente a modo de contraste.

Cualquiera de los procedimientos indicados es aplicable a cualquier obra, independientemente de la importancia de ésta, aunque se recomienda que, en las obras de clase A, según se definió en la Parte 2 de esta ROM, se realicen ensayos de carga “in situ” para confirmar los resultados de la estimación de la carga de hundimiento.

En términos generales puede decirse que el único procedimiento razonable para estimar con precisión la carga de hundimiento es el ensayo de carga; el resto de los métodos resultan imprecisos o poco fiables y, de utilizarlos aisladamente, requerirán coeficientes de seguridad amplios, tales como los que se indican tras considerar cada uno de los métodos.

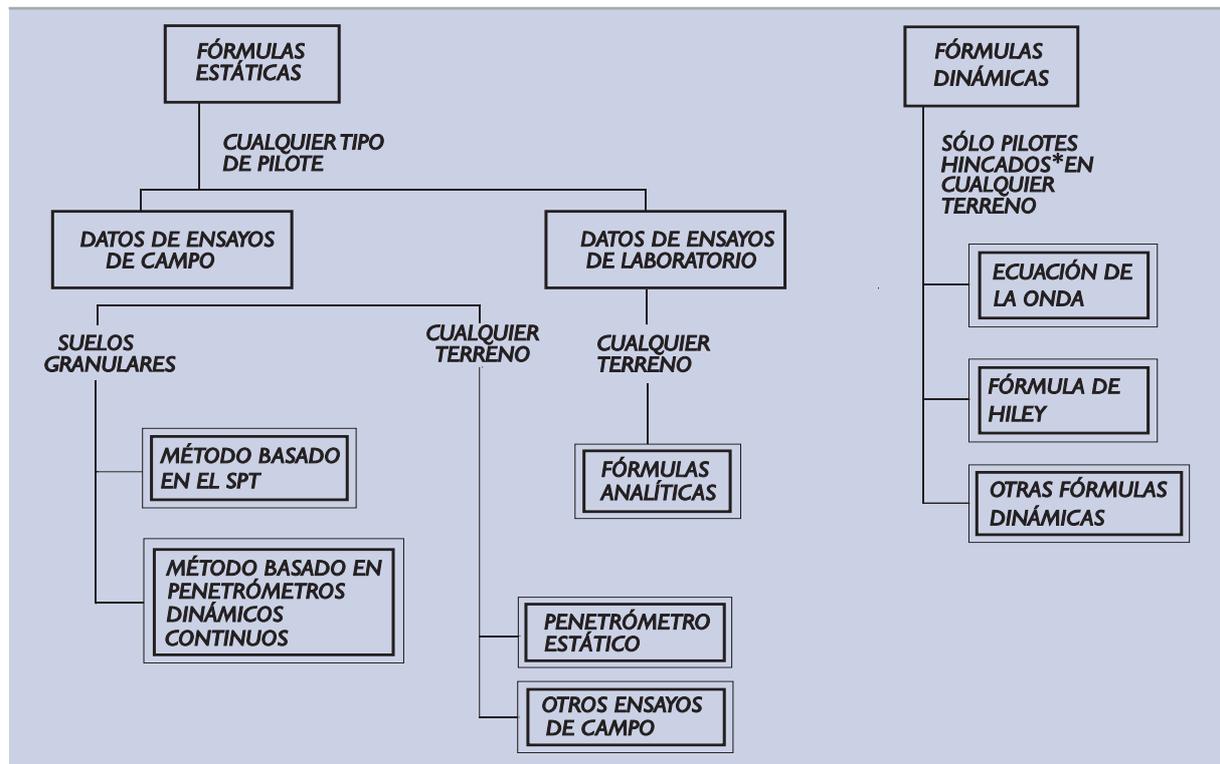
Las fórmulas o procedimientos que se dan a continuación están pensados para terrenos uniformes. Lógicamente existirán situaciones en las que el pilote interese terrenos de distinta naturaleza.

En esos casos de terreno heterogéneo, se supondrá que la carga de hundimiento por la punta está controlada por un terreno con las características medias de la zona comprendida entre dos diámetros bajo la punta (zona activa inferior) y cinco diámetros sobre la punta (zona pasiva superior), aproximadamente.

La amplitud de las zonas activa y pasiva dependen, al menos teóricamente, del ángulo de rozamiento del terreno y son tanto más amplias cuanto mayor es aquél. Ver apartado 3.6.3.1. El ingeniero deberá precisar la amplitud de estas zonas, en cada caso concreto, si ese aspecto resultara de especial importancia.

La resistencia por fuste, cuando éste atraviesa varios tipos de terreno, puede calcularse individualmente en cada terreno y sumarse posteriormente. Se advierte la salvedad de los pilotes columna sobre roca, en los que esa resistencia por fuste no debe contemplarse en los suelos cuya deformabilidad sea claramente mayor que la correspondiente a la zona de la punta.

Figura 3.6.7. Procedimientos de cálculo para la carga de hundimiento



* Y comprobación dinámica de pilotes hormigonados "in situ".

Tras estas consideraciones generales, aplicables a cualquier método de estimación de la carga de hundimiento de un pilote individual mediante fórmulas estáticas, se pasa a describir los detalles particulares de cada método de cálculo.

3.6.4.2 Carga de hundimiento en función del SPT

El método de evaluación de la seguridad frente al hundimiento de pilotes basado en el SPT es adecuado para suelos granulares que no tengan gran proporción de gravas y se puede aplicar tanto a pilotes hincados como a perforados.

Según la experiencia actual, la resistencia por punta se puede evaluar, para *pilotes hincados*, con la expresión:

$$q_p = \alpha \cdot N \quad (\text{MPa})$$

donde:

N = valor medio del índice N del SPT. A estos efectos se obtendrá la media en la zona activa inferior y la media en la zona pasiva superior. El valor de N a utilizar será la media de las dos anteriores (limitado el valor de N a 50).

α = número adimensional que depende del tipo de terreno y del tamaño del pilote.

El valor de α debe obtenerse a partir de datos locales específicos. A falta de experiencias contrastadas podrá suponerse:

$$\alpha = \left(0,1 + \frac{D_{50}}{D_r} \right) \cdot f_D \leq 0,4$$

donde:

D_{50} = tamaño medio de la curva granulométrica de las arenas (mm).

D_r = tamaño de referencia = 2 mm.

f_D = factor de corrección por tamaño del pilote. Se tomará:

$$f_D = 1 - \frac{D}{D_0} > 0,7$$

D = diámetro del pilote.

D_0 = diámetro de referencia, se tomará $D_0 = 3$ m.

Del mismo modo, la resistencia por fuste en un determinado nivel dentro del terreno para un pilote de madera o de hormigón hincado puede considerarse igual a:

$$\tau_f = 2,5 N \quad (\text{kPa})$$

Para pilotes metálicos hincados el valor de τ_f que se obtenga de esta expresión será reducido en un 10%.

En cada caso N es el valor del índice SPT al nivel considerado. Se debe utilizar, como valor de cálculo para evaluar la resistencia por punta, la semisuma del valor medio obtenido en la zona activa y del valor medio en la zona pasiva. Los valores del índice N deben ser aquéllos que corresponden a una energía nominal del 60%. Si en el ensayo en cuestión se conoce esa energía, los índices N podrán adecuarse debidamente.

Se advierte que, en cualquier caso, los índices N del SPT deben obtenerse para presiones efectivas similares a las del futuro servicio de la cimentación. Excavaciones o rellenos posteriores a la ejecución de los ensayos SPT pueden inducir cambios en el índice correspondiente, ya que el resultado del ensayo depende, entre otros factores, de la presión vertical efectiva al nivel del ensayo. Una forma de estimar el efecto en el valor de N de la posible diferencia de presiones causada por una excavación o un relleno puede hacerse con ayuda de la correlación indicada en 3.5.4.3.

En cualquier caso, no se utilizarán a efectos de estos cálculos índices N superiores a 50.

Los pilotes excavados pueden tener una resistencia por punta y por fuste claramente menor. Durante la excavación en terrenos arenosos se produce un entumecimiento del terreno y esto puede disminuir su resistencia. Por otro lado ha de considerarse que la compresión horizontal del terreno contra el fuste de los pilotes es mayor en los pilotes hincados (que desplazan y comprimen el terreno) que en los pilotes excavados «in situ». La calidad de la limpieza del fondo de los pilotes excavados «in situ» con su punta en arenas debe vigilarse, pues se cuenta con su colaboración en la capacidad portante. Para tener en cuenta estos hechos, a efectos de calcular su carga de hundimiento en arenas mediante el SPT, se aplicarán los valores de « q_p » indicados para los pilotes hincados, afectándolos por un coeficiente de reducción igual a 0.5, y se aplicarán los valores de « τ_f » indicados, afectándolos por un coeficiente reductor de 0,75. Existen procedimientos especiales (inyecciones) que pueden aumentar notablemente la resistencia de los pilotes excavados.

Para pilotes mixtos de carácter intermedio, entre los hincados y los perforados (hincas con ayudas de preexcavación, lanzas de agua, etc.), se aplicarán coeficientes de reducción comprendidos entre los anteriores y la unidad, según se estime que la ayuda a la hinca pueda disminuir más o menos el efecto de compactación del suelo granular.

Excepción de este procedimiento basado en el SPT lo constituyen las arenas calizas orgánicas (conchíferas o coralinas), que puedan dar índices SPT altos y cargas de hundimiento de pilotes bajas, debido a la rotura de la cementación que se produce con los pilotes, particularmente con los pilotes tubulares metálicos hincados. En esas situaciones los ensayos de carga son la única vía posible para estimar con alguna confianza la carga de hundimiento. El control dinámico de la hinca también puede orientar en esa estimación.

La utilización del método del SPT en suelos cohesivos sólo puede hacerse con fines orientativos; la utilización de otro método alternativo es altamente recomendable.

En rocas o en gravas, con la definición de roca aquí utilizada, la ejecución del SPT debe conducir a rechazos sistemáticos y por lo tanto a una carga de hundimiento no evaluable por este procedimiento. En estos casos ha de utilizarse un método alternativo.

3.6.4.3 Carga de hundimiento a partir de ensayos de penetración dinámica continuos

Si en un suelo granular se dispone de resultados de ensayos penetrométricos dinámicos continuos se pueden traducir los resultados correspondientes a índices SPT, según la correlación que se indica en la Parte 2 de esta ROM (apartado 2.9.5), y utilizar el método SPT.

Dada la débil correlación existente entre unos y otros ensayos de penetración, conviene consultar la experiencia local o disponer, en cada obra concreta, de ensayos de contraste que refuercen esta correlación. En cualquier caso, el ingeniero tendrá una prudencia razonable al traducir los ensayos penetrométricos dinámicos a índices N del SPT correspondiente para calcular la carga de hundimiento.

Debe tenerse especialmente en cuenta que los ensayos penetrométricos continuos pueden conducir a resultados optimistas (golpeos altos) para profundidades grandes. Salvo justificación especial, los resultados de estos ensayos no deben usarse, sin elementos de contraste, para evaluar la capacidad portante de pilotes de más de unos 15 m de longitud enterrada.

3.6.4.4 Carga de hundimiento a partir de ensayos penetrométricos estáticos

Con los penetrómetros estáticos se puede medir, de manera continua, la resistencia unitaria en la punta del cono " q_c " y por fuste " τ_f " en cualquier tipo de suelo, dependiendo de la potencia del equipo de ensayo.

Los valores medidos pueden ser aplicados al cálculo de la carga de hundimiento de pilotes verticales hincados, teniendo en cuenta las consideraciones siguientes:

- ◆ A efectos de estos cálculos no se utilizarán valores de q_c superiores a 20 MPa.
- ◆ El valor de q_c a utilizar para evaluar la resistencia por punta será la media del valor medio de q_c correspondiente a la zona activa inferior y del valor medio de q_c correspondiente a la zona activa superior.
- ◆ El valor medio se multiplicará por el factor de corrección f_D indicado en el apartado 3.6.4.2.
- ◆ Si en el ensayo se ha medido la resistencia por fuste, se aplicará directamente el valor medio correspondiente para calcular la resistencia por fuste del pilote.
- ◆ Si en el ensayo penetrométrico no se ha medido la resistencia unitaria por fuste, se podrá suponer que tal valor es igual a 1/100 de la resistencia por punta a ese mismo nivel si el suelo es granular y del orden de 1/50 si el suelo es cohesivo. En cualquier caso, la resistencia por fuste obtenida de esta manera indirecta no será superior a 0,12 MPa.

Para pilotes excavados o hincados con ayudas (perforaciones previas, lanzas de agua) ejecutados en suelos granulares se aplicarán los coeficientes reductores que se indican en 3.6.4.2.

3.6.4.5 Carga de hundimiento calculada a partir del presiómetro

El ensayo presiométrico permite obtener la "presión límite" mediante empuje horizontal contra las paredes de un sondeo. La carga de hundimiento por punta de los pilotes está relacionada con ese valor; existe una correlación lineal entre ambas variables. De acuerdo con la experiencia existente y para la estimación de la carga de hundimiento por punta de pilotes hincados, se puede escribir:

$$q_p = K (p_l - K_o \sigma'_{vo}) \cdot f_D$$

donde:

- K_o = coeficiente de empuje al reposo.
- p_l = presión límite efectiva, después de descontar la presión del agua que pudiera existir en el sondeo.
- σ'_{vo} = presión vertical efectiva al nivel del ensayo cuando se realizó éste.
- q_p = carga unitaria de hundimiento por punta para pilotes hincados.
- f_D = factor de reducción por efecto del tamaño del pilote que se indica en 3.6.4.2.
- K = factor adimensional de correlación. Si no existen estudios locales que permitan justificar un valor adecuado, puede suponerse el valor siguiente:
 - $K = 1,5$ para suelos cohesivos.
 - $K = 3,2$ para suelos granulares.

Para rocas alteradas es prudente adoptar el valor de K correspondiente a los suelos cohesivos. Si la alteración de la roca no conduce a la presencia de arcillas el parámetro K puede ser mayor, aunque nunca superior al correspondiente a los suelos granulares.

El valor de p_l a utilizar en los cálculos debe ser el valor medio correspondiente a la zona de la punta, tal como queda descrito en 3.6.4.2.

La resistencia por fuste puede suponerse igual al valor siguiente:

$$\tau_f = \frac{1}{30} p_l$$

donde:

- τ_f = resistencia unitaria por fuste para pilotes hincados.
- p_l = valor medio de la presión límite efectiva al nivel considerado.

El valor máximo de τ_f debe quedar limitado a los valores siguientes:

- $\tau_f < 125$ kPa, suelos granulares y rocas.
- $\tau_f < 90$ kPa, suelos arcillosos.

Para pilotes metálicos hincados, el valor de τ_f que se obtenga según el procedimiento anterior será reducido en un 10 %.

Para pilotes excavados en suelos granulares se harán las reducciones que se indican en el apartado 3.6.4.2; la resistencia por punta, salvo que se adopten procesos constructivos específicos, se reducirá en un 50% y la resistencia por fuste se reducirá en un 25% respecto a los valores indicados para los pilotes hincados de hormigón.

3.6.4.6 Cimentaciones con pilotes sobre roca

Es frecuente, en terrenos rocosos recubiertos por suelos, alcanzar la roca con la punta del pilote hasta empotrarse en ella. En caso de pilotes hincados no es fácil, de forma práctica, conocer el grado de empotramiento; y por lo tanto es preciso utilizar un procedimiento alternativo complementario para estimar la carga de hundimiento.

La resistencia al hundimiento de la punta de un pilote en roca puede estimarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$q_p = \frac{2}{3} p_{vh} \left(1 + 0,4 \frac{L_R}{D} \right)$$

donde:

q_p = resistencia unitaria por punta.

p_{vh} = presión vertical de hundimiento en roca determinada según se indica en 3.5.4.7

Al utilizar las expresiones que se indican en 3.5.4.7 se adoptará, como dimensión equivalente de la cimentación (variable allí denominada B^*), el valor del diámetro equivalente de la punta del pilote. Además, se adoptará $f_\delta = 1$.

L_R = longitud de empotramiento en roca, siempre que en esa longitud la roca sea de la misma calidad que la de la punta. Cuando este empotramiento sea mayor que $2,5D$ se tomará $L_R = 2,5D$.

La resistencia por fuste de pilotes en roca sólo se contabilizará en aquellas zonas donde el grado de alteración sea igual a III o inferior (para definición de grados de alteración ver 2.2.9.7).

El valor que puede utilizarse es:

$$\tau_f = \frac{1}{10} p_{vh} < 2MPa$$

donde p_{vh} será la presión vertical de hundimiento que corresponde a la roca del fuste obtenida, según se indica en 3.5.4.7, suponiendo $B^* = D$ y $f_\delta = 1$.

3.6.4.7 Métodos basados en soluciones analíticas

Este procedimiento, de aplicación general, tiene un fundamento parcial en la teoría de la plasticidad y permite la obtención aproximada de la resistencia por punta y por fuste para las tres clases de terreno consideradas y para los dos tipos de pilotes (hincados y perforados) que se consideran en estas Recomendaciones.

3.6.4.7.1 SUELOS GRANULARES

Por analogía con las fórmulas que se deducen de la teoría de la plasticidad al estudiar problemas de hundimiento, se supondrá que la carga de hundimiento por punta de pilotes hincados en suelos granulares es:

$$q_p = 3 \cdot \sigma'_{vp} \cdot N_q \cdot f_D \not\geq 20 \text{ MPa}$$

donde:

σ'_{vp} = presión vertical efectiva al nivel de la punta antes de instalar el pilote.

N_q = factor de capacidad de carga definido por la expresión

$$\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \cdot e^{\pi \cdot \tan\phi}$$

donde ϕ es el ángulo de rozamiento interno del suelo. (Este factor está definido para cada valor de ϕ , de grado en grado, en la Tabla 3.5.3).

f_D = factor adimensional definido en 3.6.4.2.

El ángulo de rozamiento ϕ debe obtenerse mediante ensayos de laboratorio realizados con muestras inalteradas o poco alteradas sometidas a las altas presiones que suelen existir en la zona de la punta de los pilotes. A falta de ensayos, el ángulo de rozamiento puede deducirse indirectamente mediante correlaciones a partir de los datos disponibles.

En caso de que la longitud " L_a " del pilote dentro de las arenas supere el valor:

$$L_a = D \cdot \sqrt{N_q}$$

donde:

D = diámetro del pilote.

N_q = factor de capacidad de carga medio en la zona de la punta (definido anteriormente).

hecho que puede ocurrir en pilotes largos, entonces se utilizará el valor de σ'_{vp} al nivel de profundidad L_a bajo la superficie de las arenas, teniendo así una consideración parcial del efecto de la profundidad crítica a partir de la cual deja de crecer la carga de hundimiento por punta.

Salvo justificación especial, no se utilizarán en los cálculos de carga de hundimiento de pilotes hincados valores de q_p superiores a 20 MPa.

La resistencia por punta de pilotes excavados será calculada como se indica y al resultado obtenido se le aplicará un coeficiente reductor de 0,5, salvo que el asiento no tenga consecuencias importantes o que se tomen precauciones especiales para mejorar el contacto del pilote con el terreno en su punta.

La resistencia por fuste en suelos granulares se estimará con la expresión:

$$\tau_f = \sigma'_v \cdot K \cdot f \cdot \operatorname{tg} \phi$$

donde:

σ'_v = presión vertical efectiva al nivel considerado.

K = coeficiente de empuje empírico.

f = factor de reducción del rozamiento del fuste.

ϕ = ángulo de rozamiento interno del suelo granular.

Para pilotes hincados se tomará $K = 0,75$ y para pilotes perforados se tomará $K = 0,5$. Para pilotes híbridos, ejecutados con ayudas que reducen el desplazamiento del terreno, se tomará un valor intermedio en función de la magnitud de esa ayuda.

Para pilotes de hormigón “in situ” o de madera se tomará $f = 1$. Para pilotes prefabricados de hormigón se tomará $f = 1$ y para pilotes de acero en el fuste se tomará $f = 0,9$.

El valor de τ_f , además, no sobrepasará los límites siguientes:

- ◆ Pilotes hincados $\tau_f < 125$ kPa
- ◆ Pilotes excavados $\tau_f < 90$ kPa

3.6.4.7.2 SUELOS COHESIVOS

La carga de hundimiento de pilotes verticales en suelos cohesivos, evaluada mediante fórmulas estáticas, ha de calcularse en dos situaciones que corresponden al hundimiento sin drenaje o a corto plazo y al hundimiento con drenaje o a largo plazo.

a. Carga de hundimiento sin drenaje

Si la carga que puede hundir el pilote se aplica rápidamente respecto a la capacidad drenante del terreno, tal como se indica en el apartado 2.2.7, la carga unitaria de hundimiento por punta “ q_p ”, tanto de los pilotes hincados como de los pilotes excavados, será:

$$q_p = (9 - 3 D) s_u > 6 s_u \quad (D \text{ en metros})$$

donde:

- D = diámetro real o virtual (igual área de punta) del pilote, expresado en metros.
 s_u = resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo al nivel de la punta (entorno de más o menos dos diámetros).

En esas mismas condiciones la carga unitaria de rotura por fuste será:

$$\tau_f = \frac{100s_u}{100 + s_u} \quad (\tau_f \text{ y } s_u \text{ en kPa})$$

La resistencia al corte sin drenaje del suelo, " s_u ", se puede deducir mediante los ensayos de campo y laboratorio indicados en la Parte 2 de esta ROM.

En pilotes con fuste de acero en contacto con el suelo cohesivo el valor de τ_f se afectará por un coeficiente reductor de 0,8.

b. Carga de hundimiento con drenaje

En los suelos cohesivos se estimará la carga de hundimiento a largo plazo utilizando los valores efectivos del ángulo de rozamiento y de la cohesión deducidos de los ensayos de laboratorio. Para ello se utilizarán las expresiones indicadas en 3.6.4.7.1 correspondientes a los suelos granulares y se añadirán los términos de cohesión correspondientes, tal como se indica a continuación.

◆ Carga por punta

Será la indicada por la expresión siguiente:

$$q_p = (3 \sigma'_{vp} N_q + 3 c' N_c) \cdot f_D \quad (\text{pilotes hincados})$$

donde:

$$N_c = \frac{N_q - 1}{\text{tg} \phi}$$

c' = cohesión efectiva.

y donde el resto de los parámetros tiene el mismo significado que se indica en 3.6.4.7.1.

Para pilotes excavados se tomará como valor de q_p la mitad del obtenido según la ecuación precedente, salvo que en su construcción se adopten medidas específicas para aumentar la resistencia por punta.

◆ Carga por fuste

Se evaluarán con la expresión siguiente:

$$\tau_f = \sigma'_v K f \text{tg} \phi + c'$$

donde:

c' = cohesión efectiva del terreno.

y donde el resto de los parámetros tiene el significado que se indica en 3.6.4.7.1.

3.6.4.7.3 SUELOS COHESIVOS BAJO LA PUNTA DE LOS PILOTES

En ciertas ocasiones se proyectan y construyen pilotajes que resisten por punta en estratos granulares resistentes que, a su vez, descansan sobre estratos o formaciones de suelos cohesivos más blandos. En estos casos

puede producirse un fenómeno de “punzonamiento” del estrato resistente y el hundimiento del pilote en el suelo blando inferior.

Pueden existir también situaciones en las que bajo la punta existan zonas de menor resistencia que reduzcan la carga de hundimiento por punta “ q_p ”. Si esa zona débil es una arcilla cuya resistencia al corte sin drenaje es “ s_u ”, la carga por punta del pilote quedará limitada por el valor siguiente:

$$q_p \leq 9s_u + \sigma'_v \left(1 + \frac{4H}{D} \operatorname{tg}^3 \phi \right)$$

donde:

- H = distancia de la punta del pilote al estrato del suelo cohesivo blando inferior.
- D = diámetro real o equivalente (igual área) del pilote.
- s_u = resistencia al corte sin drenaje del suelo cohesivo blando.
- ϕ = ángulo de rozamiento interno del material granular en la zona de la punta.
- σ'_v = presión vertical efectiva natural (sin la presencia del pilote) a la cota de ubicación de la punta.

Por otra parte, tal como se explica en 3.6.9, esta situación puede conducir a una limitación severa de la carga por razones de asientos del pilotaje.

3.6.4.8 Pruebas de carga de hundimiento

Este procedimiento es el que conduce a las estimaciones más precisas de la carga de hundimiento.

Para planificar una prueba de carga conviene considerar los siguientes elementos:

- ◆ La planificación de una prueba de carga debe realizarse después de haber completado el reconocimiento geotécnico general del emplazamiento y haber estudiado, a nivel de anteproyecto, la cimentación profunda que se pretende construir.
- ◆ El lugar que se elija como zona de ensayo debe ser representativo de la zona de interés, donde luego hayan de construirse los pilotes.
- ◆ El reconocimiento geotécnico previo del terreno en la zona de ensayo debe ser especialmente intenso para caracterizar con precisión los diferentes suelos y/o rocas que aparezcan en profundidad.
- ◆ Es siempre conveniente ensayar más de un pilote para obtener alguna información relativa a la posible variabilidad del resultado.
- ◆ El procedimiento de ejecución de los pilotes a ensayar debe ser en todo semejante al que se pretende usar en la construcción de la cimentación profunda. Puede ser de interés, por ahorro económico, ensayar pilotes de diámetro algo menor que el que se piensa utilizar en proyecto.
- ◆ Los pilotes a ensayar conviene que queden debidamente auscultados para poder separar las cargas que se transmiten por punta y por fuste.
- ◆ Los ensayos de hundimiento conviene programarlos para alcanzar claramente la carga de rotura. Esto implicaría descensos de la cabeza del pilote iguales o superiores al 10% de su diámetro. Los pilotes ensayados no podrán utilizarse para soportar las estructuras del proyecto.
- ◆ La interpretación del ensayo debe ser realizada por algún especialista pues existen detalles específicos que no son fácilmente normalizables. A falta de otro criterio mejor, se recomienda consignar como carga de hundimiento del pilote el valor de la carga máxima aplicada en su cabeza más el peso

del pilote, siempre que esa carga no supere en más de 3 veces la que produjo asiento igual al 1% del diámetro. Esto es:

$$Q_h = Q (10\%) + W < 3 Q (1\%) + W$$

donde:

- Q_h = carga de hundimiento a considerar en los cálculos.
 $Q (x\%)$ = carga aplicada en cabeza para provocar un asiento igual al x% del diámetro.
 W = peso del pilote.

En general las pruebas de carga de hundimiento son costosas, ya que se necesita la aplicación de grandes fuerzas verticales que requieren elementos de reacción importantes (anclajes, pilotes a tracción, pesos muertos, etc.). Su ejecución, sin embargo, es de interés en obras de cierta importancia; y, en todo caso, su posible realización debe considerarse.

Recientemente vienen realizándose ensayos de carga de hundimiento que pueden resultar más económicos e incluso realizarse sobre los propios pilotes que después van a usarse como definitivos. Uno de estos métodos de ensayo consiste en introducir, cerca de la punta (o en la propia punta del pilote), una célula de carga del mismo diámetro que el pilote. La expansión de la célula de carga una vez construido el pilote permite cargar el fuste hacia arriba y la punta, con igual carga, hacia abajo, obteniéndose de esta manera información de gran valor respecto a la carga de hundimiento.

Por otro lado, la evolución reciente del análisis dinámico de la hinca de pilotes permite realizar ensayos de carga dinámicos, menos violentos que la hinca, que debidamente interpretados arrojan información valiosa respecto a la carga de hundimiento.

Las variadas formas de hacer pruebas de carga, así como los modos en que pueden interpretarse, se considerarán trabajos especiales fuera del alcance de estas Recomendaciones.

Cuando se realicen pruebas de carga para ayudar en la evaluación de las cargas de hundimiento, se podrán reducir los coeficientes de seguridad correspondientes. Esa reducción será tanto más importante cuanto más extensas sean las pruebas de carga y más similares sean las condiciones de los pilotes ensayados a las reales. Con pruebas de carga adecuadas se podría llegar a utilizar los coeficientes de seguridad que se indican en 3.6.6.

3.6.5 La carga de hundimiento mediante fórmulas dinámicas

La carga de hundimiento de los pilotes hincados puede estimarse mediante “fórmulas dinámicas”, tal como se describe a continuación.

La filosofía, en este caso, es distinta de la correspondiente a las fórmulas estáticas precedentes. Con las fórmulas estáticas se busca una relación entre la carga de hundimiento y los datos del terreno y del pilote prácticamente independiente del equipo que se utilice en la ejecución del pilote. Con las fórmulas dinámicas se busca esa misma carga en función de los datos del pilote y de los datos del equipo de hinca y para ello se representa la resistencia del terreno, fundamentalmente, por el avance de la hinca que produce un golpe de maza.

Las fórmulas dinámicas no definen el valor de la carga de hundimiento, Q_h , sino la relación que existe entre la resistencia del terreno a la hinca, R_u , y el avance de la hinca en cada golpe, s , una vez conocidas las características del equipo de hinca y del pilote.

La carga de hundimiento, Q_h , suele ser semejante a la resistencia que el terreno opone a la hinca, R_u . Existen, sin embargo, procesos de relajación y de consolidación que pueden hacer que la carga de hundimiento sea menor o mayor que la resistencia al avance de la hinca.

En los suelos arcillosos puede producirse una resistencia importante al avance de la hinca de tipo transitorio que después se relaja. La carga de hundimiento estática puede ser mucho menor que la resistencia del terreno al avance de la hinca.

En suelos arcillosos es posible que con el paso del tiempo se consolide el terreno alrededor del fuste y aumente la resistencia. Se produciría así un efecto contrario al anterior.

En suelos granulares pueden ocurrir también procesos de consolidación (aumento de la resistencia con el tiempo) o relajación (disminución de la resistencia con el tiempo).

Por esos motivos es recomendable especificar en los proyectos que el avance por golpe, «s», se controle no sólo durante la hinca sino cierto tiempo después, en una rehinca posterior.

La resistencia al avance de la hinca tiene cierta componente viscosa. Esa parte, difícil de estimar a priori, sólo puede conocerse bien haciendo ensayos de carga de hundimiento estático en pilotes cuya hinca haya sido controlada debidamente.

La componente viscosa es pequeña en suelos granulares, y en general es suficiente hacer una consideración indirecta de su efecto. En suelos cohesivos este efecto de resistencia viscosa puede ser de mayor importancia y requerir un análisis más detallado (incluso realizando las pruebas de carga estática mencionadas).

3.6.5.1 Fórmulas dinámicas de la hinca

Los primeros intentos de relacionar la resistencia que ofrece el terreno al avance de la hinca, R_u , y el avance de la hinca producido por un golpe de maza, s , se basan en consideraciones de tipo energético. La energía total del golpe se consume en hacer avanzar el pilote (energía $R_u \cdot s$) más otras energías necesarias para deformar el pilote, el terreno y los elementos de transmisión del golpe.

La fórmula de Hiley es la de aceptación más extendida y su utilización se recomienda para estudios previos de selección de equipos de hinca, predimensionado de pilotes, estudios de hincabilidad (profundidades alcanzables con distintos equipos y pilotes), etc.

El proyecto de pilotajes de cierta importancia debe hacerse con otros procedimientos más adecuados.

La fórmula de Hiley se indica en la Fig. 3.6.8, aplicada al caso de un equipo de hinca de maza con caída libre. Para otros equipos de hinca la expresión es similar, sustituyendo la energía $\eta \cdot W_m \cdot h$ por la expresión correspondiente a la energía útil del equipo de hinca correspondiente.

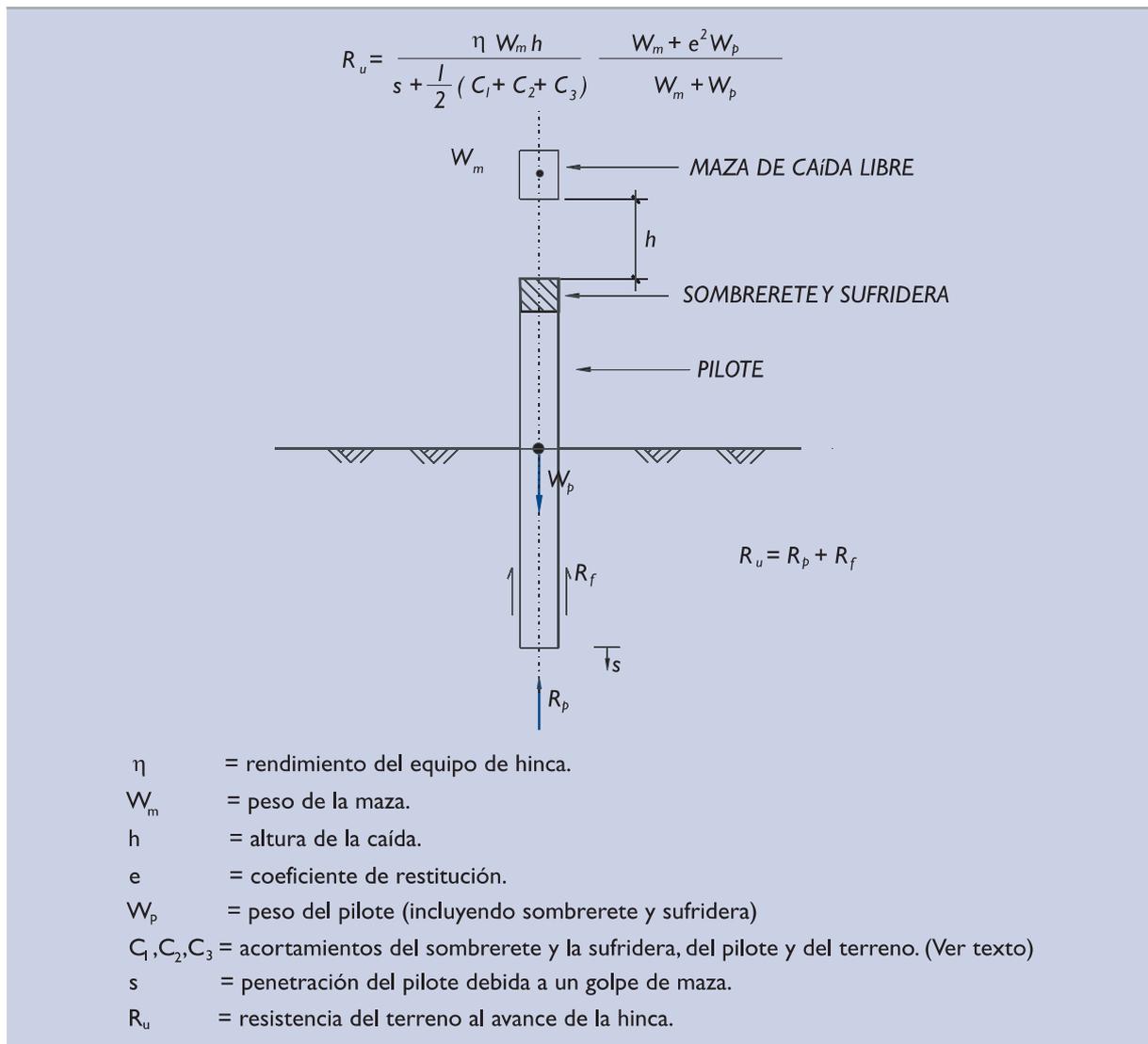
En esta fórmula se introducen conceptos de difícil cuantificación y sobre los que el ingeniero debe investigar, en su caso concreto, antes de decidir el valor adecuado.

El rendimiento del equipo de hinca “ η ” suele ser un dato suministrado por el fabricante del equipo de hinca. De esa información se suele deducir que el rendimiento oscila entre el 75% (mazas de caída libre con cabestrante y embrague) al 100% (mazas de caída libres soltadas con mecanismos automáticos). La experiencia indica que, salvo que en obra se tomen precauciones especiales, los rendimientos pueden ser muchos más bajos.

El coeficiente de restitución “ e ” mide la “elasticidad” del golpe. Sufrideras muy blandas o muy deterioradas pueden inducir a valores nulos de “ e ”. Para buenas sufrideras pueden estar indicados valores de “ e ” entre 0,2 y 0,4. Para el choque entre acero y acero (pilotes metálicos) sin sufrideras interpuestas, se puede suponer $e = 0,55$.

El acortamiento elástico del sistema de transmisión del golpe (parámetro C_1 de la fórmula) es muy variable (desde menos de 1 mm hasta cerca de 1 cm) y depende no sólo de los elementos interpuestos entre el pilote y la maza, sino también de su estado de deterioro. Este deterioro progresa a medida que avanza la hinca. En la Fase de proyecto se recomienda que los avances de la hinca se calculen suponiendo que estos elementos no están deteriorados.

Figura 3.6.8. Hincas de pilotes. Fórmula de Hiley



En consecuencia, antes de medir los avances de la hincas en la obra, se procederá a renovar cualquier elemento que esté deteriorado, siempre que esa medida se vaya a utilizar para calcular la resistencia del terreno.

El acortamiento elástico del pilote (parámetro C_2 de la fórmula) puede evaluarse con la expresión:

$$C_2 = \frac{R_u}{AE} \cdot l$$

donde:

- A = área neta de la sección transversal del pilote.
- E = módulo de elasticidad.
- l = longitud del pilote equivalente.

La longitud del pilote equivalente puede suponerse igual a la longitud total del pilote (opción conservadora) o suponerse algo más corta, teniendo en cuenta que parte de la zona enterrada está sometida a esfuerzos de compresión menores, debido a la transmisión parcial de carga por fuste.

El parámetro de compresión temporal del terreno (C_3 en la fórmula de Hiley) se obtiene de experiencias prácticas y normalmente se supone igual a 2,54 mm (la décima parte de una pulgada). Curiosamente, otros métodos de cálculo más avanzados confirman lo adecuada que resulta esta hipótesis de cálculo aparentemente caprichosa.

Existen otras fórmulas dinámicas cuya utilización no es recomendable, ya que únicamente podrían ofrecer la ventaja de ser de expresión analítica menos complicada.

Con la fórmula de Hiley es posible suponer una serie de valores de R_u e ir calculando los correspondientes valores de “s” y con ellos construir una curva que los relaciona.

En la práctica habitual, en lugar de “s” se utiliza una variable equivalente, que es el número de golpes de maza necesarios para avanzar la hincia una determinada longitud.

En la práctica existe cierta tendencia a denominar “rechazo” a la penetración que se consigue con un golpe de maza al finalizar la hincia, de manera que al avance “s” a veces se le denomina rechazo.

Las curvas de resistencia al avance frente al número de golpes necesarios para avanzar una determinada longitud son las denominadas “curvas de hincia”. El ingeniero debe incluir en su proyecto las curvas de hincia correspondientes al equipo (o equipos) que puedan utilizarse en la hincia y, además, especificar el “rechazo” (el avance por golpe o el número de golpes para una determinada penetración) que debe conseguirse.

Durante la ejecución de la obra se comprobará que, en la fase terminal de la hincia, el pilote entra en el terreno a ritmos menores que los estipulados. Esto se debe comprobar, como ya se ha dicho, con el equipo de hincia en las mismas condiciones en que se ha elaborado la curva, trabajando a pleno rendimiento y con el sistema de transmisión del golpe no deteriorado; su rigidez debe ser similar a la que se haya utilizado para confeccionar las curvas de hincia.

3.6.5.2 La ecuación de la onda

La aparición de los primeros ordenadores permitió calcular la relación entre “ R_u ” y “s” que se buscaba con las fórmulas dinámicas de la hincia de una manera que se cree, hoy, más exacta. Al menos, permite tener en cuenta algunos efectos no contemplados anteriormente.

El método que se ha venido a denominar “ecuación de la onda” es, por lo tanto, un procedimiento alternativo al de las fórmulas dinámicas de la hincia. Con este método se pueden obtener “curvas de hincia” cuya utilización posterior en el proyecto y en la obra sería igual que el de las fórmulas dinámicas precedentes.

El cálculo del avance de la hincia “s” debido a un golpe de maza se realiza, en este caso, con un modelo discreto como el indicado en la Fig. 3.6.9.

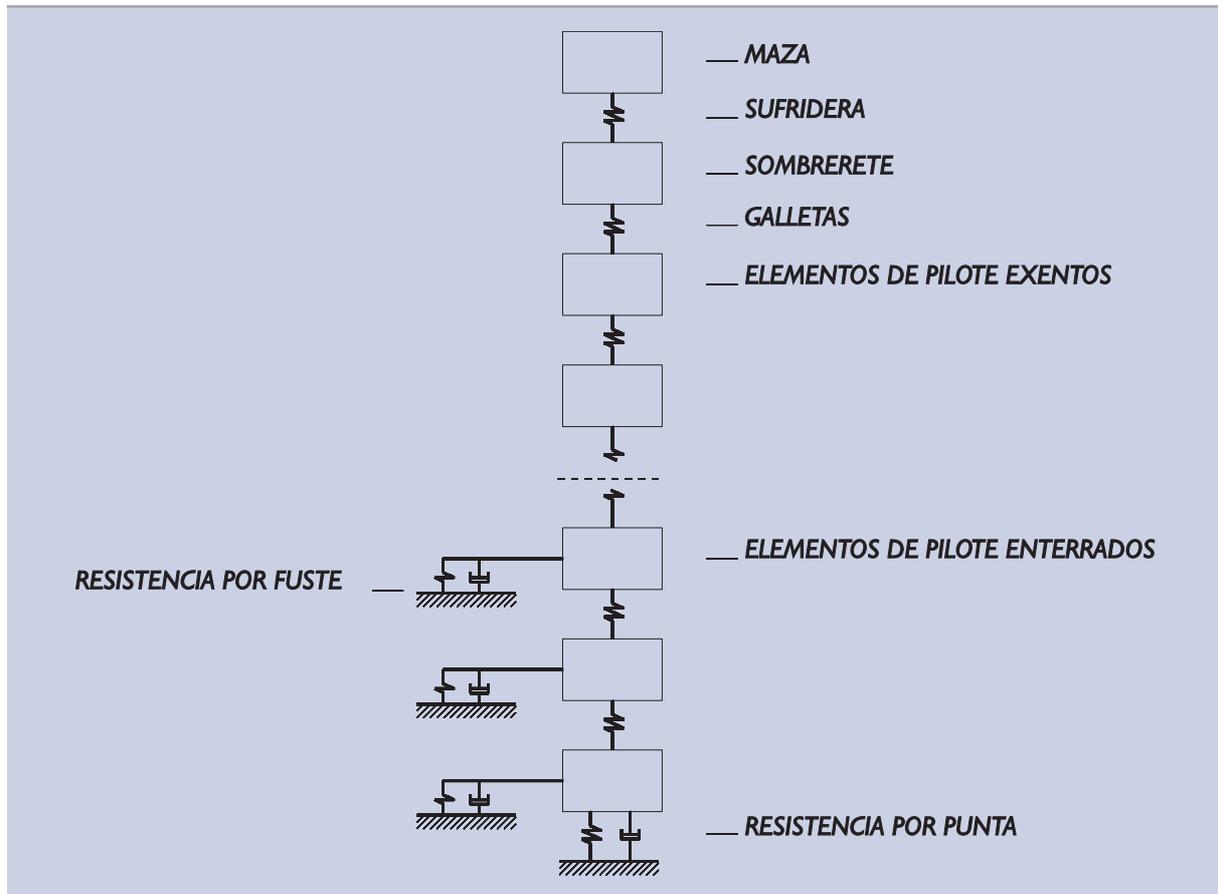
Cada elemento de pilote se representa con un bloque rígido donde se supone concentrada toda la masa y un resorte cuyo acortamiento equivale al del tramo de pilote representado. Algo similar se hace con la maza y con los elementos transmisores del golpe. A estos efectos, la experiencia acumulada en la aplicación de la fórmula de Hiley (valor de la constante C_1) es aplicable al caso.

El terreno queda representado por resortes y amortiguadores en los que se supone que, cuando se alcanza una fuerza igual a “ ΔR_u ”, el contacto se rompe, manteniéndose esa fuerza constante.

El valor de “ ΔR_u ” debe prejugarse distribuyendo la resistencia total R_u (dato de partida) entre los distintos elementos. El resultado dependerá (no cambia radicalmente) de la forma en que se haga el reparto de resistencias. El ingeniero debe hacer un reparto adecuado, similar al que se espera en la realidad.

Las constantes de resorte de los muelles que representan el terreno son:

Figura 3.6.9. Modelo discreto de la ecuación de la onda



$$K_{(\text{terreno})} = \frac{\Delta R_u}{C_3}$$

donde “ ΔR_u ” tiene el significado antes dicho y C_3 es el acortamiento de cada muelle en el momento de la rotura. La experiencia de uso de la fórmula de Hiley hace que en la mayoría de las aplicaciones se suponga $C_3 = 2,54$ mm.

El amortiguador viscoso proporciona una resistencia adicional que se supone proporcional a la resistencia elástica:

$$(\Delta R_u)_{\text{viscosa}} = \Delta R_u \cdot J_s \cdot V$$

donde:

- J_s = coeficiente de resistencia viscosa (en s/m).
- V = velocidad del movimiento del pilote (en m/s).

El coeficiente de resistencia viscosa tiene valores típicos, según indica la experiencia, entre 0,15 y 0,20 s/m para arenas y 0,50-0,70 s/m para arcillas. En la zona de la punta del pilote, parece que el efecto viscoso es mayor en las arenas (J_s hasta 0,50 s/m en arenas) y puede ser más bajo en las arcillas (incluso menor que 0,1 s/m).

La influencia de este último factor puede ser decisiva en algunos casos, y por lo tanto el ingeniero debe considerarlo con detalle y hacer los análisis de sensibilidad oportunos.

La respuesta de este sistema discreto a un golpe de maza es fácilmente obtenida mediante integración en diferencias finitas con un sencillo programa de ordenador (existen versiones académicas que lo hacen con programas de menos de cincuenta sentencias).

El resultado será el avance, “s”, provocado por un golpe de maza para la configuración definida al distribuir la resistencia total supuesta, R_u .

El cálculo permite, además, obtener tensiones en cada punto del pilote durante el golpe de maza, datos que pueden ser de interés en el proyecto estructural.

El cálculo puede complicarse suponiendo condiciones iniciales distintas del estado de tensiones nulas (serían entonces las tensiones residuales existentes debidas a golpes anteriores). También puede completarse simulando uniones (habituales en pilotes largos) o introduciendo leyes de comportamiento más complejas.

La utilización posterior de curvas de hinca generadas con la ecuación de la onda está sujeta a las mismas recomendaciones que las indicadas para el caso de las otras fórmulas dinámicas de la hinca.

3.6.5.3 El control de la hinca

La carga de hundimiento de un pilote hincado puede estimarse a la hora del proyecto, ya sea mediante la ecuación de la onda o mediante las fórmulas de hinca más simplificadas.

El control de ejecución es, en esos casos, indispensable ya que la carga de hundimiento del pilote no está asociada a una profundidad determinada, sino a otras especificaciones del proyecto (equipos de hinca y criterios de rechazo).

El control de la hinca debe ser acorde con el procedimiento de estimación de la carga de hundimiento utilizado en la Fase de proyecto y puede consistir en una simple comprobación de las características del equipo de hinca y el control de avance.

Hoy es una práctica habitual en las obras de cierta importancia realizar un control rutinario de la hinca de cada pilote e instrumentar alguno o todos los pilotes que se hincan, para obtener datos complementarios de campo que confirmen las hipótesis de proyecto.

La instrumentación adicional consiste en colocar, cerca de la cabeza del pilote, dos acelerómetros piezoeléctricos (después se promediarán sus lecturas) y dos strain-gauges (o extensómetros) que miden el acortamiento en dos segmentos de generatrices opuestas del pilote, también en la zona próxima a la cabeza (serán también promediadas).

Con otros equipos se obtiene un registro de velocidad (integrando temporalmente las aceleraciones) y de fuerza. Para obtener el segundo registro es preciso conocer y suministrar como datos de cálculo al ordenador (o microprocesador de campo) los datos del área de la sección neta transversal del pilote, A , y su módulo de elasticidad, E . La medida de campo consiste en el acortamiento vertical unitario, ε , de manera que el producto de los tres datos conduce al valor de la fuerza de compresión en la sección instrumentada:

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon$$

La teoría más elemental de la dinámica (elasticidad lineal) indica que el acortamiento unitario en un punto cualquiera debido al paso de una onda de choque es proporcional a la velocidad del movimiento del pilote V , esto es:

$$\varepsilon = \pm \frac{V}{c}$$

donde: $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$

siendo ρ la densidad del material del pilote.

El signo positivo ocurre cuando la onda de choque y la velocidad (que sería positiva sólo en sentido descendente) tienen igual sentido (onda de compresión directa producida en primera instancia por la hinca) mientras que el signo negativo se aplica cuando esos sentidos son contrarios (onda de compresión ascendente producida como reflejo de la respuesta del terreno a la hinca).

En esta relación aparece como constante de proporcionalidad la celeridad de la propagación de ondas en el material del pilote "c" que es una característica del material.

La proporcionalidad de acortamientos y velocidades permite establecer una relación similar entre fuerzas y velocidades:

$$F = \pm \frac{AE}{c} \cdot v$$

Al cociente AE/c se le denomina, en estos estudios de control dinámico de la hinca de pilote, con el nombre de impedancia del pilote.

$$\text{Impedancia, } Z = \frac{AE}{c}$$

También se cumple:

$$Z = A \cdot \rho \cdot c$$

Por lo tanto, la traducción más simple del contenido de la ecuación diferencial que gobierna el proceso de hinca es:

$$F = \pm ZV$$

Para el control dinámico de la hinca, se suele añadir como dato complementario el valor de la impedancia del pilote, para que el procesador multiplique siempre por él los registros de velocidades.

El resultado del control de la hinca será, con este sistema, un registro temporal de fuerzas F y productos impedancia-velocidad ZV en una sección próxima a la cabeza del pilote. Es posible obtener el registro en otras secciones adicionales pero no es recomendable, ya que la información adicional no sería siempre sustanciosa y sería más difícil de obtener; habría de hacerse en la parte enterrada (varias secciones de la zona exenta del pilote no darían información adicional significativa).

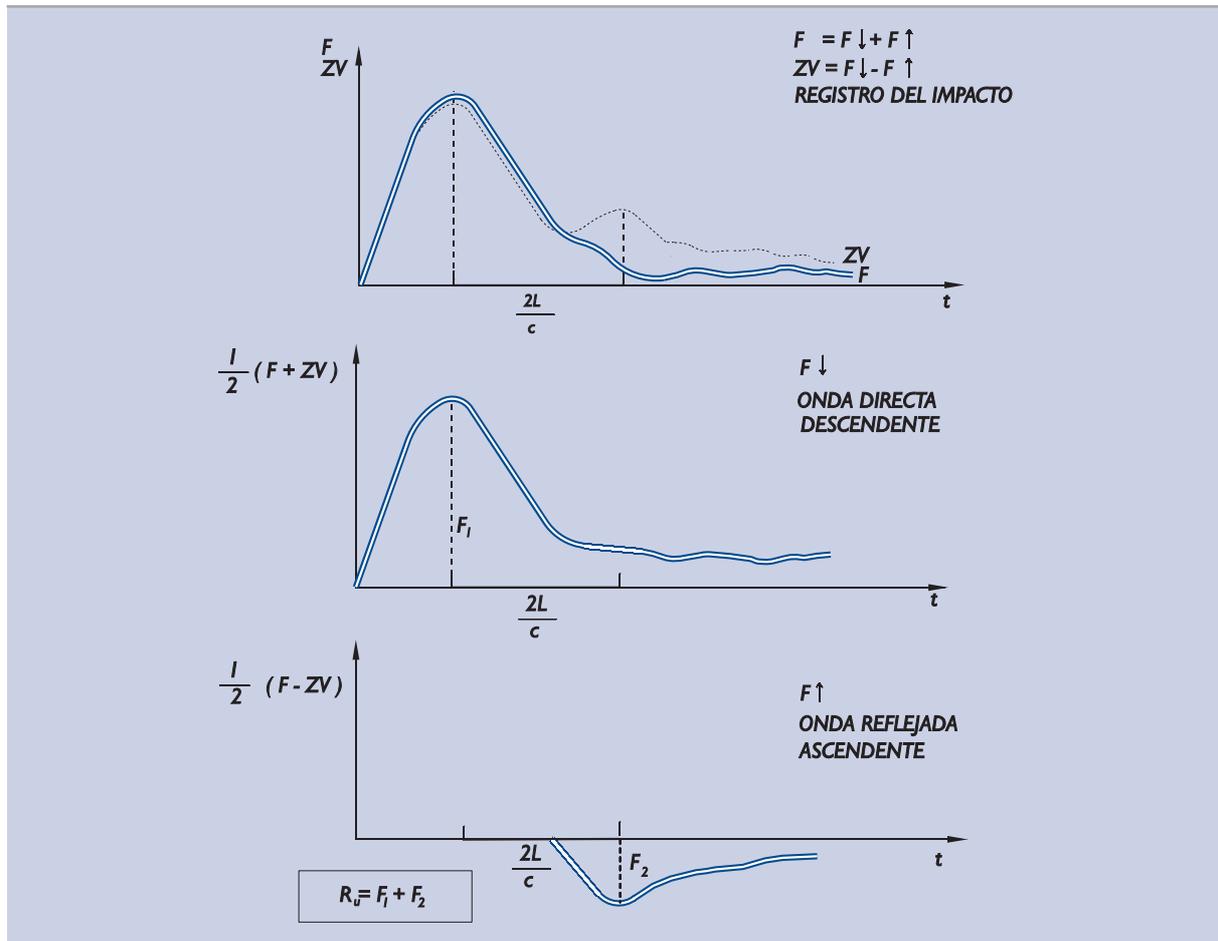
La utilidad de estos registros es múltiple, ya que de ellos pueden obtenerse conclusiones acerca de la resistencia al avance, acerca de la integridad del pilote y, lo que es más importante, acerca del rendimiento energético del equipo de hinca. El análisis detallado de los registros permite, además, investigar otros aspectos.

a. Resistencia a la penetración

En la Fig. 3.6.10 se indica un registro típico de F y ZV causado por un golpe de maza en la cabeza de un pilote cuya hinca se controla como se ha dicho en los párrafos precedentes. F y ZV son idénticos mientras el efecto dinámico es únicamente debido al paso de una onda descendente.

Cierto tiempo después, cuando existen reflexiones del terreno, tanto F como ZV son debidos tanto a ondas descendentes como ascendentes cuyos efectos deben separarse, tal como se indica en esa figura. De esa manera queda aislada la respuesta del terreno, que tiene un pico desplazado respecto al pico del impacto un tiempo $2L/c$, donde L es la longitud del pilote, medida desde el nivel de la instrumentación hasta la punta.

Figura 3.6.10. Resistencia a la penetración de un pilote obtenida del control dinámico de la hincada



La hipótesis de interpretación más sencilla consiste en suponer que la suma de ambas fuerzas, la de la onda directa F_1 y la de su reflejo F_2 , ha sido la resistencia al avance opuesta por el terreno. En la figura se ha representado un caso en el que la onda reflejada es de tracción, de manera que la resistencia al avance, R_u , resulta menor que F_1 , tal como suele ocurrir al comienzo de la hincada, cuando se está lejos de alcanzar los máximos aprovechamientos del pilote, del equipo de hincada y de la capacidad resistente del terreno.

La máxima resistencia que se puede llegar a movilizar con un golpe de maza es, teóricamente, $2 F_1$. Cuando eso ocurre se refleja una onda de compresión de tanta amplitud como la que provoca inicialmente la maza en la zona de la cabeza.

El máximo valor de F_1 está limitado por el equipo de hincada y por la resistencia estructural del propio pilote. Su valor máximo es ZV_0 , siendo V_0 la velocidad de caída de la maza. Ese máximo sólo se alcanza con mazas suficientemente pesadas y con elementos adecuados de transmisión del golpe.

Las velocidades máximas que se suelen provocar en los pilotes están limitadas por posibles daños estructurales en el pilote; rara vez superan 1,5 m/s. De ese modo, los pilotes hincados suelen tener una carga de hundimiento del orden de 3 m/s multiplicado por su impedancia, o inferior.

Es posible tener en cuenta, en estas interpretaciones, el efecto de la componente viscosa de la resistencia al avance. La velocidad de penetración del pilote, en el momento en que se calcula R_u , es tal que:

$$ZV = F_1 - F_2$$

y, por lo tanto, se podría pensar que existe una componente viscosa proporcional a la velocidad.

$$(R_u)_{\text{viscosa}} = J \cdot ZV$$

En este caso J sería un coeficiente adimensional, que no debe confundirse con el valor J_s que se suele utilizar en la ecuación de la onda. Allí tiene dimensiones y su significado es distinto.

Teniendo esto en cuenta, la resistencia del terreno al avance de la hinca, una vez descontada la parte viscosa, sería:

$$R_u^* = F_1 (1 - J) + F_2 (1 + J)$$

No existe aún experiencia acumulada suficiente para conocer los valores usuales de J en cada tipo de terreno. Hasta hoy, o bien se suponen valores nulos o del orden de 0.1, como máximo, en suelos granulares y mayores, incluso próximos a la unidad, en suelos cohesivos.

El ingeniero puede investigar el efecto de esta componente viscosa hincando el mismo pilote con carreas de maza un poco mayores y un poco menores que las especificadas. El valor de la resistencia al avance será diferente pero su componente no viscosa debe permanecer constante.

b. Integridad de los pilotes

El control dinámico de la hinca, o la rehinca controlada de pilotes de cualquier tipo, permite obtener registros de F y ZV similares a los indicados en el primer diagrama de la Fig. 3.6.10.

En caso de existir algún defecto estructural (reducción de la impedancia Z del pilote), se registra una onda reflejada prematura cuyo análisis permite localizar y cuantificar el daño.

Aunque la interpretación de esos casos es simple, no es posible incluir aquí las recomendaciones necesarias. El ingeniero que pudiera detectar un defecto de este tipo debe recurrir a la literatura técnica o a especialistas para investigar mejor la cuestión.

c. Rendimiento del equipo de hinca

Probablemente la mayor aportación reciente al estudio de la dinámica de la hinca de los pilotes, conseguida a través de la auscultación, haya sido la capacidad de medir la energía que atraviesa una determinada sección del pilote durante un golpe de maza.

Es claro que la energía útil para la hinca es igual a la integral siguiente:

$$\text{Energía} = \int_{t_0}^{t_1} F \cdot V \cdot dt$$

Esa integral, hecha en una sección del pilote, entre el inicio y el final del paso de la onda de choque, la realizan los microprocesadores de campo con relativa facilidad. Su resultado se conoce antes de que se vuelva a dar otro golpe de maza.

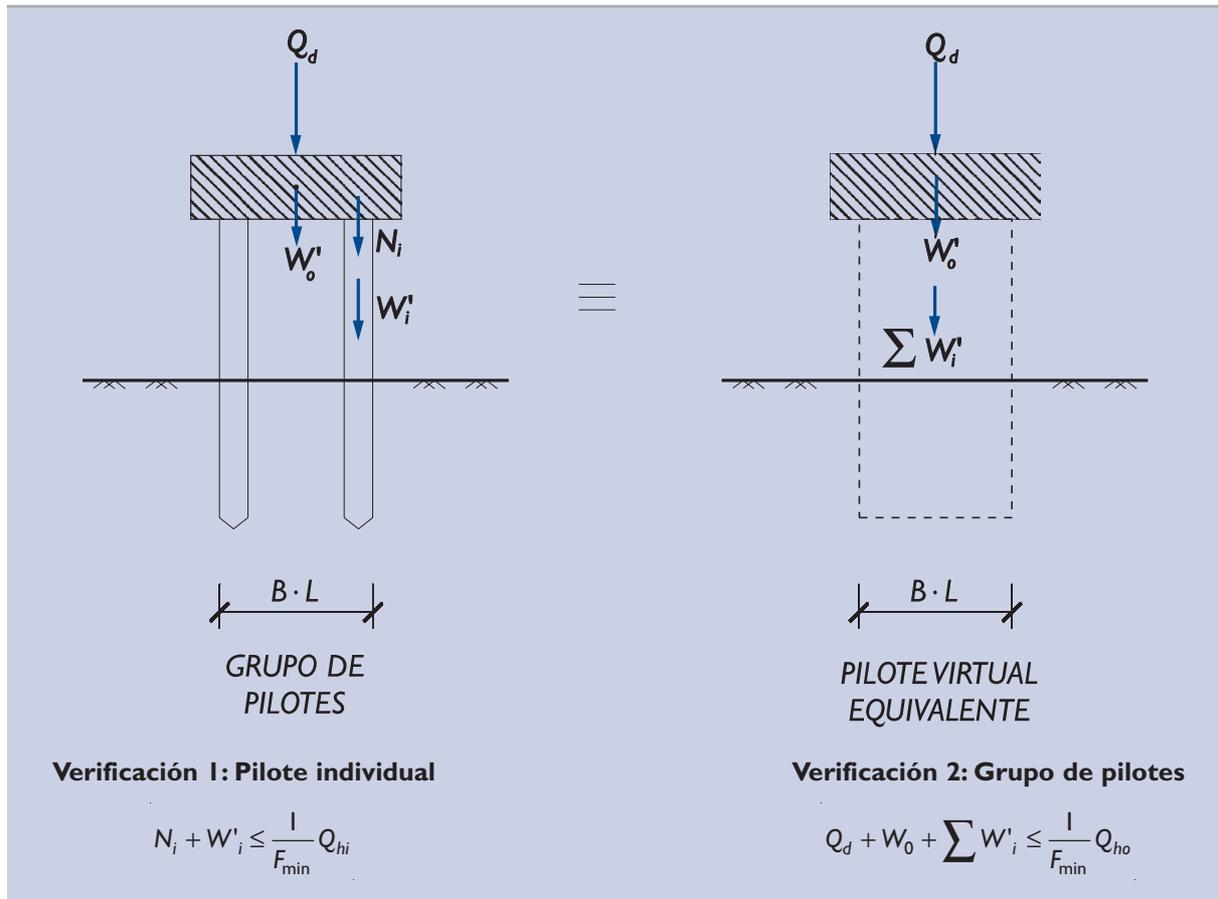
La experiencia indica que esa energía, comparada con la energía nominal de la maza, corresponde a rendimientos que pueden ser muy bajos. Los rendimientos son muy sensibles a detalles tales como el estado de las galletas o sufrideras que transmiten el golpe, a la correcta alineación maza-pilote, etc.

Este motivo es el que más mueve a recomendar la auscultación electrónica de la hinca de pilotes en obras de importancia. Con ello se reduciría la incertidumbre que de otra forma habría sobre el rendimiento del equipo de hinca, y de ese modo se podrían utilizar coeficientes de seguridad más bajos, tal como se indica en 3.6.6.

3.6.6 Verificación de la seguridad frente al hundimiento

Para verificar la seguridad frente al hundimiento de una cimentación profunda es preciso comprobar que el coeficiente de seguridad frente al hundimiento es suficientemente elevado en cada uno de los pilotes del grupo, y también en el conjunto del grupo considerado como un pilote virtual equivalente. Ver Fig. 3.6.11.

Figura 3.6.11. Verificación de la seguridad frente al hundimiento



3.6.6.1 Hundimiento individual de un pilote

La verificación de la seguridad de un pilote queda concluida cuando se cumple:

$$F = \frac{Q_{hi}}{N_i + W'_i} \geq F_{\min}$$

donde:

- F = coeficiente de seguridad frente al hundimiento.
- N_i = carga vertical que actúa sobre el pilote. Para su obtención se habrá distribuido la carga que actúa sobre el conjunto de pilotes en cada uno de ellos, considerando el peso del posible encepado y eventualmente el de las tierras que pudieran gravitar sobre él. Las cargas deberán haber sido mayores tal como se indica en la Tabla 3.3.2.

- W'_i = peso efectivo de la parte exenta del pilote (fuera del terreno) que eventualmente pudiera existir.
 Q_{hi} = carga de hundimiento del pilote aislado.
 F_{\min} = coeficientes de seguridad que se indica en la Tabla 3.6.1.

Las cargas de hundimiento, Q_{hi} , se pueden estimar por los procedimientos indicados en los apartados precedentes, según el tipo de terreno, el tipo de pilote y el tipo de información disponible.

3.6.6.2 Hundimiento conjunto del grupo

En un grupo de pilotes próximos entre sí es posible que la carga de hundimiento de un pilote equivalente al conjunto de grupo sea menor que la suma de las cargas de hundimiento de cada uno de los pilotes; de ahí la necesidad de la doble comprobación.

El pilote virtual equivalente al grupo quedaría definido por una longitud igual a la longitud media de los distintos pilotes del grupo y por un área de su sección transversal igual al área interior de la línea de geometría simple (círculo, cuadrilátero, etc.) que puede circunscribir al grupo en planta. Como contorno del pilote equivalente se adoptará la longitud de esa línea.

El peso enterrado del pilote equivalente, importante en estos cálculos, será la suma de la parte enterrada de los pesos de todos los pilotes más el terreno interior a la línea de contorno equivalente desde el nivel superior del terreno hasta el nivel medio de las puntas. Esos pesos se contabilizarán sumergidos en las zonas en que lo estén. Este peso se utilizará para estimar la carga de hundimiento adecuada, Q_{ho} , de trayéndolo de la suma de resistencias por punta y por fuste. Ver apartado 3.6.4.1.

La verificación de la seguridad frente al hundimiento conjunto del grupo de pilotes queda concluida cuando se cumple la desigualdad siguiente:

$$F = \frac{Q_{ho}}{Q_d + W'_o + \sum W'_i} \geq F_{\min}$$

donde:

- F = coeficiente de seguridad frente al hundimiento.
 Q_d = componente vertical de las cargas, debidamente mayoradas, que actúa sobre la cara superior del encepado.
 W'_o = peso efectivo del encepado, sumergido en su caso.
 $\sum W'_i$ = suma de los pesos efectivos de la parte exenta (por encima del terreno) de todos los pilotes del grupo.
 Q_{ho} = carga de hundimiento del pilote virtual equivalente al grupo, calculada como se indica en este apartado 3.6.
 F_{\min} = coeficiente de seguridad mínimo que se indica en la Tabla 3.6.1.

3.6.6.3 Coeficientes de seguridad mínimos frente al hundimiento

En los casos más generales de obras con índice ISA bajo (5 a 19), los valores mínimos recomendados del coeficiente de seguridad son los que se indican en la Tabla 3.6.1, según los distintos métodos utilizados en la evaluación de la carga de hundimiento.

Para situaciones transitorias o de corto plazo debe tenerse en cuenta lo especificado en 3.3.8.1.

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores de F pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10.

Tabla 3.6.1. Coeficientes de seguridad, F, mínimos frente al hundimiento de pilotes. Obras con ISA bajo (5 a 19)

Procedimiento de análisis utilizado en la estimación de la carga de hundimiento	Coeficiente de seguridad (Combinaciones)		
	Cuasi-Permanente, F ₁	Fundamental, F ₂	Accidental o sísmica, F ₃
Cualquier tipo de pilotaje ⁽¹⁾			
Método del SPT en suelos granulares	2,5	2,2	2,0
Método basado en el penetrómetro estático	2,0	1,8	1,7
Métodos basados en otros ensayos penetrométricos continuos, ensayos presiométricos y otros ensayos de campo	2,6	2,3	2,1
Método basado en la resistencia a compresión simple de la roca (sólo para pilotes empotrados en roca)	2,5	2,2	2,0
Método basado en las fórmulas analíticas y ensayos de laboratorio para medir el ángulo de rozamiento (o de laboratorio o campo para medir la resistencia al corte sin drenaje de arcillas)	2,5	2,2	2,0
Pilotes hincados			
a) Con control del avance y aplicación de la fórmula de Hiley ⁽²⁾	2,5	2,2	2,0
b) Con control de avance y aplicación de la ecuación de la onda ⁽²⁾	2	1,8	1,7
c) Con control electrónico de la hinca	1,6	1,5	1,4
d) Con control electrónico de la hinca y contraste con pruebas de carga	1,4	1,3	1,3

(1) Cuando el cálculo sea contrastado con ensayos de carga de hundimiento "in situ", los coeficientes de seguridad indicados pueden reducirse entre un 10% y un 15%, dependiendo del número de pilotes ensayados y de la dispersión de resultados obtenidos en las pruebas. Ver apartado 3.6.4.8.

(2) Los coeficientes indicados corresponden a hincas suaves o moderadamente duras, entendiéndose por tales aquellas en las que el rechazo final (avance de la hinca con un golpe de maza) es superior a 2 mm (dos milímetros). Para hincas más duras deben utilizarse coeficientes de seguridad mayores, o, alternativamente, limitar la carga en las curvas de hinca de forma que no crezca para rechazos inferiores al indicado.

3.6.7 Verificación de la seguridad frente al arranque

3.6.7.1 El pilote individual

La resistencia al arranque de un pilote individual es igual a la resistencia por su fuste más la componente correspondiente al peso propio del pilote. La resistencia por fuste en arranque, según la experiencia existente, es menor que la resistencia por fuste a compresión.

La forma más precisa de determinar la resistencia al arranque de un pilote es la realización de ensayos de carga.

A falta de ensayos o experiencias que indiquen un valor más preciso, se tomará, como resistencia al arranque o extracción "T" de un pilote, el valor:

$$T = W_{\alpha} + 1/2 R_f$$

donde:

W_{α} = componente del peso del pilote en la dirección del tiro.

R_f = resistencia por fuste determinada según se indica en 3.6.4.

Se supone que el tiro o esfuerzo de extracción se ejerce según el eje del pilote.

3.6.7.2 Consideración del efecto grupo

La resistencia al arranque de un grupo de pilotes será el menor valor de los dos siguientes:

- a. La suma de las resistencias al arranque individuales de cada uno de los pilotes del grupo.
- b. La resistencia de un pilote virtual, formado por los pilotes y el terreno de su entorno y cuyo fuste fuese la envolvente exterior del grupo de pilotes.

3.6.7.3 Seguridad frente al arranque

La situación de pilotes trabajando a tracción no es usual en obras de ingeniería civil; en cualquier caso, pueden darse circunstancias aisladas en las que se produzca alguna de las situaciones siguientes:

- a. Un pilote, de forma individual, es solicitado a tracción (valor de N_i negativo).

En estos casos se puede dar por verificada la seguridad cuando se cumple:

$$F = \frac{T}{|N_i|} \geq F_{\min}$$

donde:

- F = coeficiente de seguridad al arranque.
 T = resistencia al arranque. Apartado 3.6.7.1.
 $|N_i|$ = valor absoluto de la carga mayorada, según se indica en 3.6.3.3, que actúa sobre la cabeza del pilote. La cabeza se supone al nivel de terreno.
 F_{\min} = coeficiente de seguridad que se indica en la Tabla 3.6.1, para obras con ISA bajo (5 a 19). Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.6.1 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

- b. El grupo de pilotes, o varios de ellos, trabaja a tracción.

En esa circunstancia se hará, además de la comprobación individual antes indicada, la comprobación correspondiente a un pilote virtual equivalente al grupo de pilotes en tracción, de acuerdo con la expresión siguiente:

$$F = \frac{T}{|Q_d|} \geq F_{\min}$$

donde:

- $|Q_d|$ = valor absoluto de la tracción mayorada que actúa sobre el grupo, al nivel de las cabezas de los pilotes; incluirá el peso efectivo del encepado y de la parte exenta de los pilotes.
 T = resistencia al arranque del grupo de pilotes en tracción, obtenida de acuerdo con lo establecido en el apartado 3.6.7.2.
 F_{\min} = coeficiente de seguridad que se indica en la Tabla 3.6.1 para obras con ISA bajo (5 a 19). Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.6.1 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

3.6.8 Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno por tiro o empuje horizontal

3.6.8.1 El pilote individual

Los grupos de pilotes que estén sometidos a cargas horizontales pueden tener disposiciones especiales, de manera que esas cargas sean soportadas principalmente por compresión en las cabezas de algunos pilotes inclinados.

En cualquier caso, existirán buen número de situaciones en las que los pilotes, individualmente, hayan de soportar cargas perpendiculares a su eje; serían cargas horizontales en pilotes verticales.

Cuando se ejerce una fuerza transversal excesiva sobre la cabeza de un pilote, normalmente se provocan grandes flexiones y, por eso, se produce la rotura del propio pilote. El estado límite correspondiente está condicionado normalmente por la resistencia estructural del propio pilote. Ese tipo de rotura se analiza en el apartado 3.6.10. En la práctica habitual esta situación se conoce como “pilote largo”.

Supuesto que el pilote soportase esos esfuerzos, el límite de la carga depende de la resistencia del terreno. Esto suele ocurrir en pilotes poco empotrados o muy resistentes respecto a la propia resistencia lateral del terreno frente a sus empujes. En la práctica habitual esta situación se conoce como “pilote corto”. El Estado Límite Último correspondiente es de tipo geotécnico (GEO) y el procedimiento de análisis recomendado se describe en este apartado.

La carga horizontal que ha de aplicarse a la cabeza del pilote para provocar la rotura del terreno por empuje pasivo “ H_{rot} ” se puede estimar con el esquema de cálculo que se indica en la Fig. 3.6.12.

El valor de x , necesario para el cálculo de H_{rot} , debe determinarse mediante la ecuación de equilibrio de momentos.

$$(e + z_{CR}) \cdot CR = (e + z_R) \cdot R$$

La altura de aplicación del empuje H , distancia “ e ” en el esquema de la figura mencionada, es un dato importante en estos cálculos y en ocasiones no es bien conocida. El punto donde se aplica la carga H es un punto de momento flector nulo en el eje del pilote que el ingeniero debe decidir en función de otros cálculos estructurales.

Los casos particulares de $c = 0$ (terreno puramente granular) y de $\phi = 0$ (terreno puramente cohesivo) han sido resueltos y tabulados y se recogen en las Figs. 3.6.13 y 3.6.14, tomadas de Broms ⁽¹³⁾ (1964).

La situación singular que se menciona en las Figs. 3.6.12 y 3.6.13 como caso particular de desplazamiento rígido horizontal correspondería a una situación hipotética en la que alguna causa externa (encepado rígido común, tiro más profundo, etc.) obliga a que coincidan las líneas de acción del empuje y de la resistencia. En esa situación el problema es más simple ya que no se produce contrarreacción y el equilibrio de momentos queda satisfecho por la hipótesis de desplazamiento rígido horizontal.

Ha de hacerse notar que, en esas figuras, se hace la hipótesis adicional de no contar con la colaboración resistente del terreno superficial en un espesor igual a vez y media el diámetro de pilote; únicamente se cuenta con la colaboración de su peso. Alguna hipótesis semejante habría de realizar el ingeniero para contar con posibles socavaciones, erosiones o excavaciones, que tanta influencia tienen en la resistencia horizontal.

Además, en el gráfico de Broms correspondiente a terrenos puramente cohesivos ($\phi = 0$), el empuje unitario en rotura se supone igual a $8 c_u$ (únicamente para el caso de desplazamiento rígido horizontal) en lugar del valor (que se cree más adecuado) de $9 c_u$ que resultaría del procedimiento general de cálculo indicado en la Fig. 3.6.12.

(13) “Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils” and “Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils”. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering. ASCE.

Figura 3.6.12. Esquema de cálculo de la fuerza horizontal de rotura

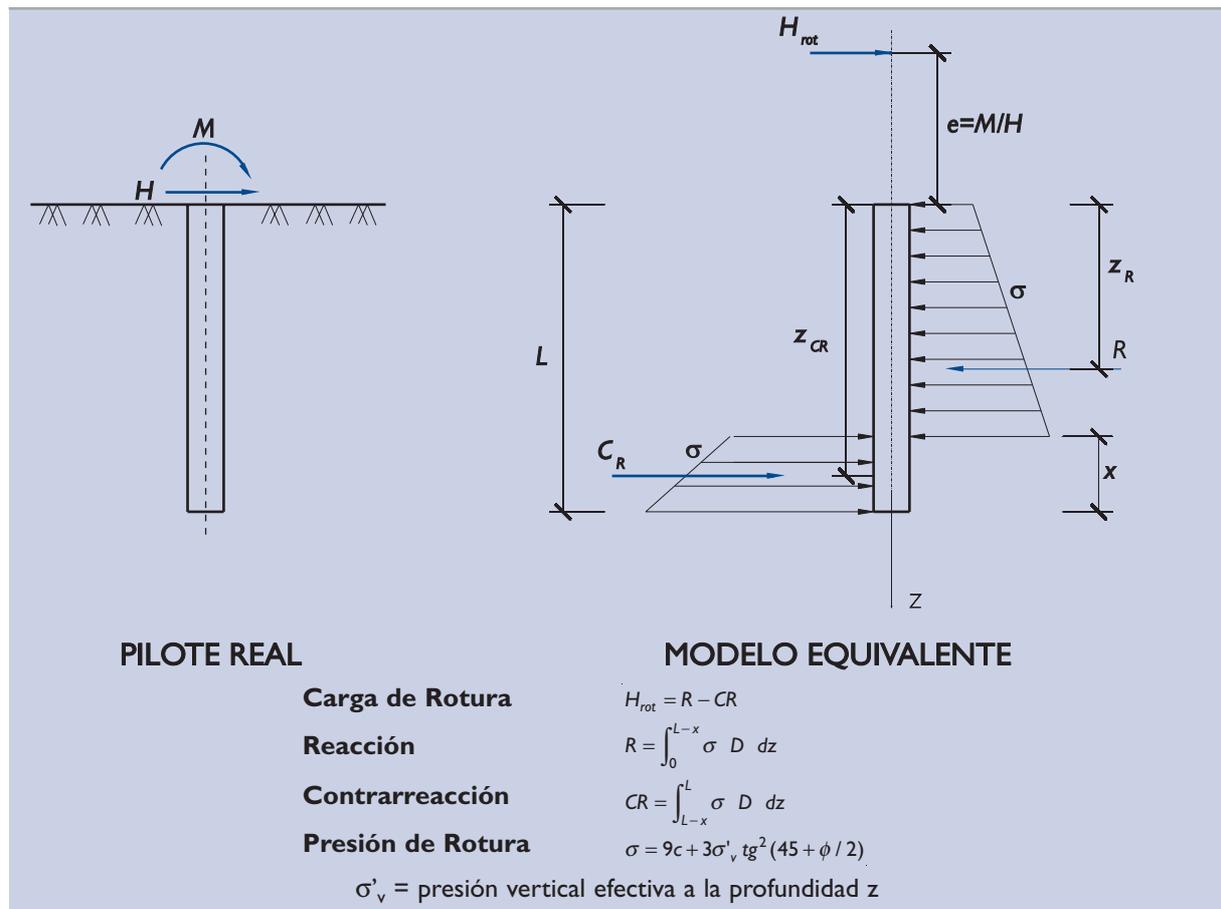
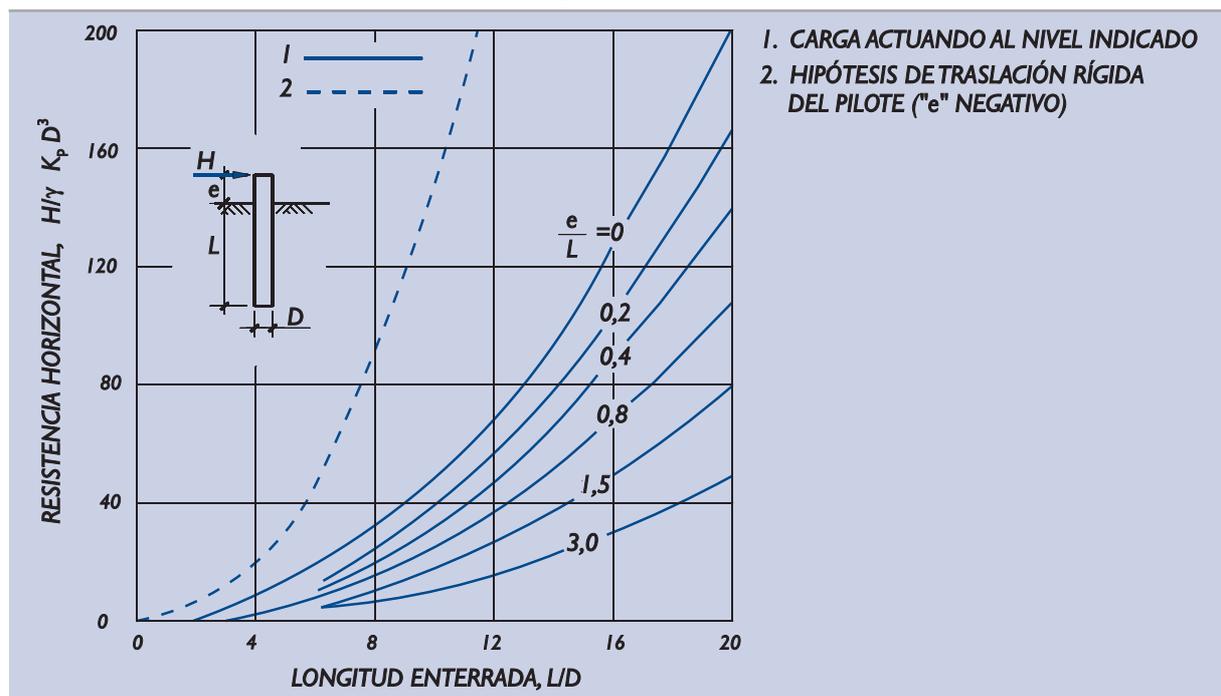
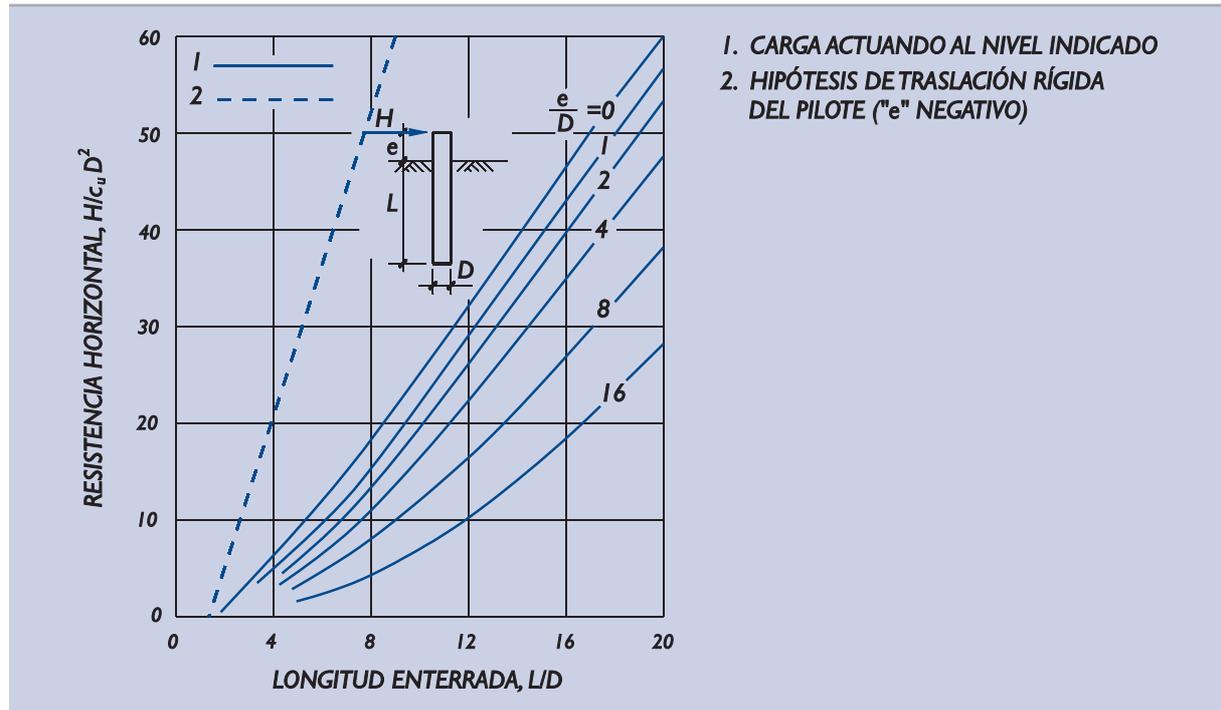


Figura 3.6.13. Rotura horizontal del terreno: suelos granulares (Broms)



Debe advertirse que el gráfico de la Fig. 3.6.13 define la carga de rotura para distintos valores de «e» expresándolos en forma adimensional; dividiéndolos por la longitud del pilote (parámetro e/L). La Fig. 3.6.14 utiliza, sin embargo, el diámetro del pilote para hacer adimensional la excentricidad (parámetro e/D). Esas formas se han creído convenientes para conseguir una mayor claridad en el dibujo de las curvas correspondientes.

Figura 3.6.14. Rotura horizontal del terreno: suelos puramente cohesivos (Broms)



El valor de H_{rot} puede ser menor cuando la fuerza horizontal aplicada tiene carácter oscilante. La alternancia de cargas puede provocar una situación en la que la parte alta del terreno no colabore en la resistencia. El análisis de ese efecto ha de realizarse por algún procedimiento cuya descripción se sale del alcance de esta ROM.

3.6.8.2 Consideraciones del efecto grupo

La resistencia frente a esfuerzos horizontales de un grupo de pilotes por rotura del terreno se estimará como el menor valor de los dos siguientes:

- La suma de las resistencias horizontales de cada pilote calculada individualmente.
- La resistencia horizontal de un pilote equivalente cuyo diámetro fuese la anchura del grupo y cuya profundidad fuese igual a la profundidad media de los pilotes del grupo.

En casos en que este aspecto del proyecto resultara crítico se utilizarían procedimientos de cálculo más detallados.

3.6.8.3 Coeficiente de seguridad frente a la rotura horizontal del terreno

Una determinada comprobación de seguridad se puede dar por satisfecha cuando:

$$F = \frac{H_{rot}}{H} \geq F_{min}$$

El coeficiente de seguridad F debe calcularse para el pilote individual (apartado 3.6.8.1) y para el grupo (3.6.8.2).

Los coeficientes de seguridad F_{min} que deben utilizarse frente a este modo de rotura del terreno son los que se indican en la Tabla 3.6.2 para obras con índice de repercusión socio-ambiental (ISA) bajo.

Tabla 3.6.2. Coeficientes de seguridad mínimos frente a la rotura horizontal del terreno. Obras con ISA bajo (5 a 19)

Tipo de combinación	Coeficientes de seguridad, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,8
Fundamental, F_2	1,6
Accidental o Sísmica, F_3	1,5

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles por criterios de optimización económica, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.6.2 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

En proyectos donde este aspecto resultase crítico para el dimensionamiento del pilotaje, se recomienda realizar pruebas de carga que permitan una estimación más exacta de la carga de rotura.

En caso de utilizar pruebas de carga en la estimación de la carga horizontal de rotura, se podrán reducir los coeficientes de seguridad mínimos en función de la importancia de las pruebas.

Las cargas cíclicas horizontales pueden aumentar las deformaciones o incluso crear despegues permanentes en suelos cohesivos. Este efecto se tendrá en cuenta también al considerar los aspectos deformacionales (apartado 3.6.9).

3.6.9 Verificación de los Estados Límite de Servicio

3.6.9.1 Asientos

Si el problema del asiento de la cimentación pilotada resulta ser un aspecto crítico del proyecto, es recomendable realizar pruebas de carga, ya que ésta es la única manera precisa de conocer la relación carga-asiento.

En los casos en los que este aspecto no resulte crítico, se pueden estimar los asientos tal como se indica a continuación y considerar que el asiento así estimado debe ser, al menos, tres veces menor del que pone a la estructura fuera del límite de servicio.

Existen soluciones analíticas o semianalíticas y se pueden formular modelos numéricos para resolver el problema del cálculo de asientos de pilotes aislados o de grupos de pilotes. El problema, sin embargo, depende tanto de las condiciones locales en la zona de contacto del pilote con el terreno que tales métodos pueden resultar poco exactos.

A falta de ensayos de carga específicos se recomienda el siguiente procedimiento para estimar asientos.

3.6.9.1.1 ASIENTOS DEL PILOTE AISLADO

El asiento típico de un pilote vertical aislado sometido a una carga vertical de servicio en su cabeza igual a la máxima recomendable por razones de hundimiento, estimada según se ha descrito en el apartado 3.6.4, está próximo al dos y medio por ciento de su diámetro más el acortamiento elástico del pilote. Con esa idea, la relación carga-asiento se puede expresar mediante la siguiente fórmula aproximada:

$$s_i = \left(\frac{D}{40 Q_h} + \frac{l_1 + \alpha l_2}{AE} \right) \cdot P$$

donde:

- s_i = asiento del pilote individual aislado
- D = diámetro del pilote (para formas no circulares se obtendrá un diámetro equivalente)
- P = carga sobre la cabeza
- Q_h = carga de hundimiento
- l_1 = longitud del pilote fuera de terreno
- l_2 = longitud del pilote dentro del terreno
- A = área de la sección transversal del pilote
- E = módulo de elasticidad del pilote
- α = parámetro variable según el tipo de transmisión de cargas al terreno, $\alpha=1$ para pilotes que trabajan principalmente por punta y $\alpha=0,5$ para pilotes flotantes. Para situaciones intermedias, α tiene también valores intermedios entre los dos citados, interpolables linealmente en función de las cargas por punta y por fuste estimadas.

3.6.9.1.2 CONSIDERACIÓN DEL EFECTO GRUPO

En los grupos de pilotes y debido a la interferencia de las cargas, el asiento del grupo puede ser mayor que el de un pilote aislado sometido a la carga individual correspondiente. Para tenerlo en cuenta se puede hacer la siguiente estimación:

- a. Para pilotes columna en roca, trabajando por punta, separados más de tres diámetros, el efecto grupo se considera despreciable.
- b. Para otras situaciones se puede suponer que toda la carga del grupo está uniformemente repartida en un plano situado a la profundidad “z” bajo la superficie del terreno.

$$z = \alpha \cdot l_2$$

con los significados de “ α ” y “ l_2 ” mencionados en 3.6.9.1.1 y con unas dimensiones transversales $B_1 \times L_1$ dadas por:

$$\begin{aligned} B_1 &= B_{\text{grupo}} + (1 - \alpha) l_2 \\ L_1 &= L_{\text{grupo}} + (1 - \alpha) l_2 \end{aligned}$$

El cálculo del asiento debido a esa carga vertical repartida en profundidad puede estimarse con los procedimientos generales de cálculo de asientos, alguno de los cuales se describe en el apartado 3.5.7.

3.6.9.2 Movimientos horizontales y esfuerzos

Si el movimiento horizontal de la cimentación pilotada resulta ser un aspecto crítico del problema en estudio, será necesario hacer pruebas de campo para estimarlos.

En obras en las que ese aspecto no sea crítico, se puede realizar un cálculo aproximado según se indica en los apartados que siguen.

Los movimientos horizontales que pongan fuera de servicio a la estructura que apoya sobre los pilotes habrán de ser, al menos, tres veces mayores que los que se estiman de la manera simplificada que se va a recomendar. De otra forma, serían necesarias las pruebas de carga o la adaptación del proyecto para soportar mayores movimientos.

Para calcular los movimientos horizontales en pilotes solicitados por cargas transversales se debe utilizar algún procedimiento numérico. Existen métodos de cálculo en los que el pilote se representa mediante una viga elástica y en los que el terreno se introduce como una serie de resortes (relaciones p-y entre presión y desplazamiento) que han sido deducidas de experiencias previas en distintos tipos de terreno.

Las relaciones carga unitaria-desplazamiento pueden ser de tipo no lineal para simular el comportamiento del terreno cerca de la rotura. En ese caso, además, este procedimiento permite conocer también el valor de la carga horizontal de rotura. Este sería un sistema alternativo al que se indica en 3.6.8 para calcular esa carga.

3.6.9.2.1 MÉTODO SIMPLIFICADO

El modelo numérico mencionado en 3.6.9.2 puede resultar complejo cuando se pretende realizar el cálculo simultáneo de varios pilotes o de varias cimentaciones pilotadas. El número de resortes necesarios para representar el terreno podría resultar excesivo.

El método simplificado que puede usarse para representar el terreno por un resorte único equivalente es el que se describe en este apartado y se cree suficientemente preciso para aquellas situaciones en las que este aspecto del comportamiento no resulte ser crítico o condicionante.

Para aplicar este método es preciso conocer el tipo de terreno diferenciando los terrenos granulares de los cohesivos.

En terrenos granulares se calculará la "longitud elástica" T mediante la expresión siguiente:

$$T = \left(\frac{EI}{\eta_h} \right)$$

donde:

- E = módulo de elasticidad del material que forma el pilote.
- I = momento de inercia de la sección transversal recta del pilote respecto a un eje ortogonal a la dirección de la carga. $I = \pi D^4/64$ en pilotes circulares macizos de diámetro D.
- η_h = parámetro del terreno que se indica en la Tabla 3.6.3.

En suelos cohesivos puede suponerse:

$$T = \left(\frac{EI}{100c} \right)^{1/4}$$

donde las variables E, I tienen el significado antes apuntado y:

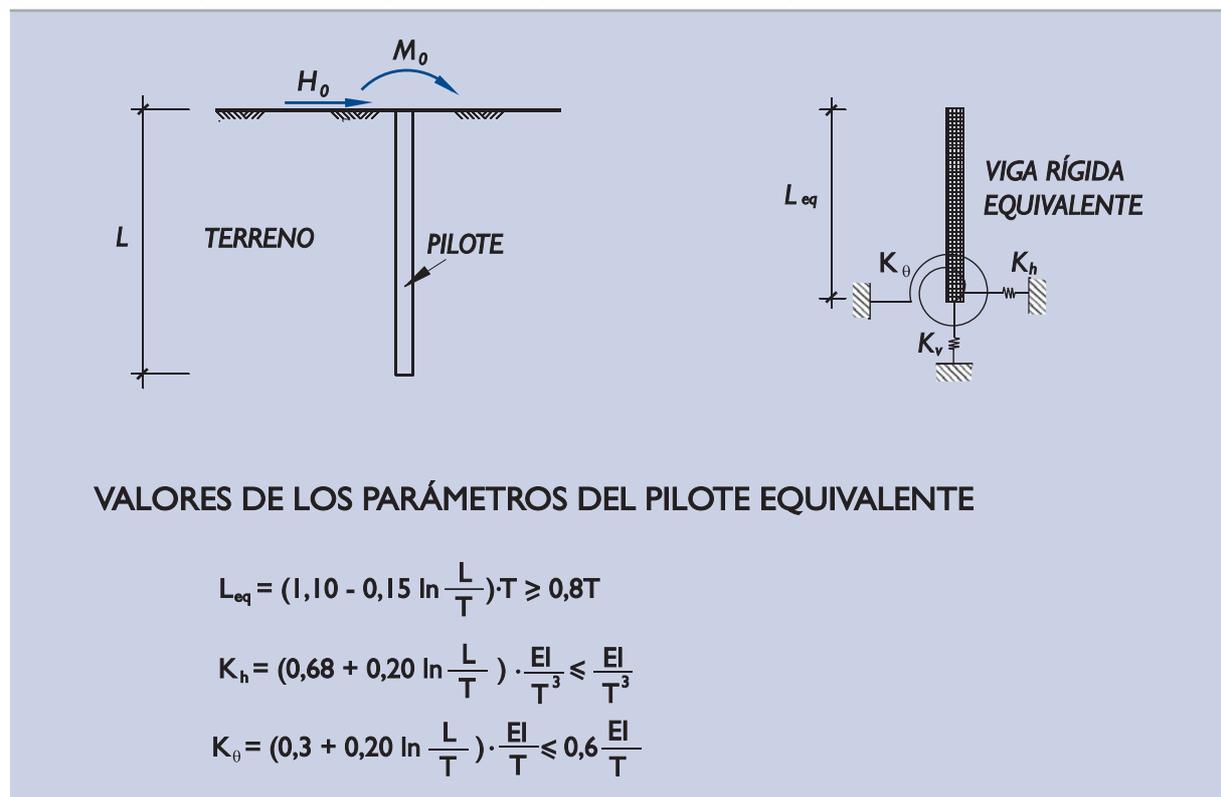
- c = valor medio de la resistencia al corte del suelo en la zona de profundidad 3D contada desde la superficie del terreno considerada en el cálculo.

Tabla 3.6.3. Valores del parámetro n_h (MPa/m)

Compacidad de las arenas	Situación respecto al nivel freático	
	Por encima	Por debajo
Floja	2	1,2
Media	5	3
Compacta	10	6
Densa	20	12

Es conveniente que en estos cálculos se desprece la colaboración de suelos superficiales flojos y se tenga en cuenta, además, la existencia de cierta zona superior donde el pilote pudiera no estar en contacto permanente con el terreno. Esta zona puede tener mayor amplitud cuando la carga horizontal tiene carácter cíclico alternativo.

Conocido el valor de T , el terreno y la parte enterrada del pilote pueden representarse por una viga rígida (indeformable) sustentada en su punta por unos resortes cuya constante elástica se indica en la Fig. 3.6.15.

Figura 3.6.15. Representación simplificada de la parte enterrada de un pilote

Nota: El significado de las variables se indica en el texto. Para valor K_y ver 3.6.10.1.

Para obtener los esfuerzos en la parte enterrada de los pilotes, se pueden consultar los textos donde figuran las soluciones semianalíticas de la teoría de la viga elástica. En estas Recomendaciones se acepta la solución simplificada siguiente:

$$\begin{array}{ll} \text{Flexión} & M = H_0 \cdot z_0 \cdot \alpha + M_0 \beta \\ \text{Cortante} & Q = H_0 \beta \end{array}$$

donde α y β son números adimensionales que cambian con la profundidad z de acuerdo con la relación indicada en la Tabla 3.6.4.

El valor de z_0 , es una profundidad de referencia que depende de la longitud del pilote dentro del terreno "L" y de su longitud elástica "T". Se puede estimar mediante la ecuación:

$$z_0 = T \cdot \left(0,25 + 0,8 \ln \frac{L}{T} \right) \leq 1,3 T$$

El modelo indicado en este apartado es aplicable cuando el pilote está suficientemente enterrado dentro del terreno; al menos dos veces y media su longitud elástica.

Tabla 3.6.4. Factores de reducción de los esfuerzos en la zona enterrada de los pilotes

Profundidad z/z_0	Factores de reducción	
	α	β
0	0,00	1,00
0,5	0,52	0,95
0,8	0,62	0,88
1,0	0,64	0,75
1,2	0,62	0,62
1,5	0,54	0,42
2,0	0,32	0,15
2,5	0,13	0,05
3,0	0,00	0,00

Para estimar el movimiento horizontal del grupo de pilotes, se deben consultar las publicaciones técnicas que puedan ilustrar el problema concreto en estudio. Para analizar aquellas situaciones en que los movimientos horizontales que se estimen resulten unas tres veces inferior al que daña la estructura, llevándola más allá de su límite de utilización, se puede adoptar el procedimiento simplificado descrito en este apartado, pero modificando algo las longitudes equivalentes de la viga rígida y las constantes de resorte que representan a la parte enterrada del pilote.

Cada pilote del grupo se puede considerar sustituido, en su parte enterrada, por una varilla rígida virtual soportada por los resortes indicados en la Fig. 3.6.15, pero afectando a la longitud elástica estimada en la hipótesis de "pilote aislado" por un coeficiente de mayoración.

$$T \text{ (pilote dentro del grupo)} = \alpha \cdot T \text{ (pilote aislado)}$$

A falta de datos concretos más fiables, se recomienda utilizar los valores de "α" siguientes:

$$\alpha = 1 + \frac{0,5}{m^2} < 1,25$$

donde "m" es la relación que existe entre la separación de pilotes dentro del grupo y su diámetro. Para grupos de pilotes espaciados entre sí más de 3 veces el diámetro, no es necesario considerar este efecto.

3.6.10 Consideraciones sobre los modos de fallo de tipo estructural

Los pilotes deben cumplir, como elemento estructural, condiciones de seguridad y de comportamiento en servicio iguales que el resto de los elementos estructurales de la obra.

La determinación de los esfuerzos actuantes en los pilotes es, sin embargo, un tema de interacción suelo-estructura complejo sobre el que se indican, a continuación, algunas recomendaciones.

3.6.10.1 Distribución de cargas en grupos de pilotes

La carga individual actuando en cada pilote de un grupo en condiciones próximas a la de servicio puede obtenerse mediante un cálculo elástico en el que cada pilote queda representado por su parte exenta unida a una varilla rígida sujeta en su extremo inferior con los resortes elásticos que se indican en la Fig. 3.6.14 y teniendo en cuenta las modificaciones por efecto grupo definidas en el apartado 3.6.9.2.1.

La constante de resorte vertical será, en pilotes aislados, el cociente entre la carga vertical P y el asiento s que produce en el pilote al nivel del terreno.

Esa relación, deducida de la fórmula indicada en 3.6.9.1.1 resulta:

$$K_v = \frac{l}{\left(\frac{D}{40Q_h} + \frac{\alpha l_2}{AE} \right)}$$

con los significados de las variables que allí se indican.

Para el caso de pilotes dentro de un grupo es preciso, antes, calcular el asiento esperado según se indica en 3.6.9.1.2.

Con esos cálculos se puede estimar el asiento medio del grupo, s_{grupo} , correspondiente a la carga vertical total, N_{grupo} , y obtener una aproximación de la relación carga asiento; $K_{v,\text{grupo}}$.

$$K_{v,\text{grupo}} = \frac{N_{\text{grupo}}}{s_{\text{grupo}}}$$

Este factor puede considerarse integrado como suma de las contribuciones de todos los pilotes del grupo.

$$K_{v,\text{grupo}} = \sum K_{v,i}$$

La distribución de la rigidez total, $K_{v,\text{grupo}}$, entre los distintos pilotes del grupo, $K_{v,i}$, es un problema que sólo puede resolverse consultando la literatura técnica especializada.

Para proyectos en los que este aspecto no sea crítico y siempre que el encepado sea suficientemente rígido, se recomienda repartir proporcionalmente la rigidez total estimada entre los diversos pilotes de manera ponderada. A cada pilote se le asignaría un factor de ponderación.

$$f_i = A_i E_i p_i$$

siendo p_i un número adimensional que depende de la posición relativa del pilote dentro del grupo.

El factor p_i varía entre la unidad para los pilotes externos del grupo, un valor mayor para los pilotes internos y puede llegar a 1,5 para pilotes internos en grupos densos. Para grupos de pilotes separados más de siete diámetros, los factores de ponderación p_i pueden considerarse iguales a la unidad.

Con estas consideraciones, la relación carga-asiento de un pilote dentro de un grupo resulta:

$$K_{v,i} = \frac{N_{\text{grupo}}}{s_{\text{grupo}}} \cdot \frac{A_i E_i p_i}{\sum A_i E_i p_i}$$

3.6.10.2 Resistencia estructural

Las acciones en el pilote pueden provocar el agotamiento de la capacidad estructural de su sección resistente.

En general, los esfuerzos en los pilotes serán definidos por leyes de variación de los valores correspondientes de los esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores a lo largo de su eje.

Igual que en cualquier otro elemento estructural se comprobará, a todo lo largo del pilote, que la capacidad resistente comparada con los esfuerzos estimados conduce a los mismos niveles de seguridad que se requieran en el proyecto en cuestión para los elementos estructurales.

La comprobación del pandeo de pilotes con parte exenta se realizará con modelos de coacciones que simulen el empotramiento en el terreno mediante resortes como los indicados en los apartados 3.6.9 y 3.6.10.

El pandeo de los pilotes totalmente enterrados en general no necesita ser considerado, salvo en el caso de pilotes que atraviesan capas de suelos cohesivos blandos o muy blandos. En esos casos se comprobará, además, que la carga axial, N , es claramente inferior a la carga teórica de pandeo dada por la expresión:

$$K_{\text{pandeo}} = 8 \cdot (s_u EI)^{\frac{1}{2}}$$

donde:

s_u = resistencia media al corte sin drenaje en el estrato blando.

EI = producto de inercia de la sección del pilote.

El coeficiente de seguridad frente a pandeo $F = N_{\text{pandeo}}/N$, deducido de esta expresión debe ser superior, en todo caso, al mínimo que se indica para hundimiento en la Tabla 3.6.1 (fórmulas analíticas).

El cálculo estructural del pilote se sale del alcance de esta ROM dedicada a la geotecnia. En el cálculo estructural serán necesarias otras comprobaciones y la utilización de otros métodos. Las consideraciones indicadas en este apartado 3.6.10, deben seguirse únicamente con carácter orientativo y en ausencia de otras recomendaciones más específicas. En todo caso es conveniente que, en condiciones de servicio (cargas sin mayorar), la compresión normal media que actúa sobre la sección del pilote no sobrepase los valores señalados en la Tabla 3.6.5 ⁽¹⁴⁾.

Tabla 3.6.5. Compresión media máxima en pilotes

Tipo de material	Tipo de ejecución	Forma de trabajo	
		Flotante	Apoyo en roca
Hormigón armado ($f_{ck} \geq 2,5$ MPa)	Hincados	0,3 f_{ck}	
	Excavados con entibación	5 MPa	6 MPa ⁽¹⁵⁾
	Excavados (otros procedimientos)	4 MPa	5 MPa
Hormigón pretensado	Hincados	0,3 ($f_{ck} - 0,9 f_p$)	
Metálicos	Hincados	0,33 f_{yk}	
Madera	Hincados	5 MPa	

f_{ck} = resistencia característica del hormigón a compresión.

f_p = compresión nominal provocada por las armaduras activas.

f_{yk} = límite elástico de acero.

(14) Estas tensiones son las que definen el concepto de "tope estructural" que suele utilizarse en el proyecto de cimentaciones profundas.

(15) El control intenso de la ejecución puede justificar la utilización de topes estructurales mayores para pilotes empotrados en roca, pero nunca en más de un 20% de valor indicado.

3.7 ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN DE EMPUJES DE TIERRAS

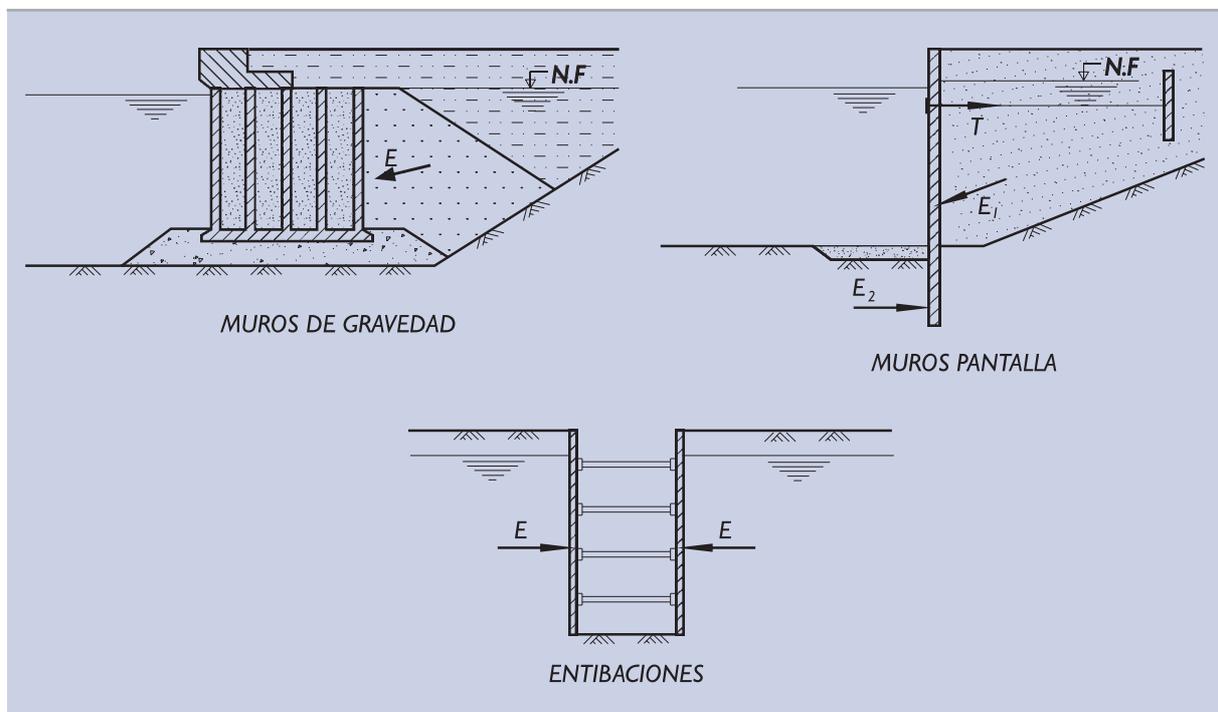
3.7.1 Tipologías

Las estructuras de contención son aquellos elementos artificiales utilizados para crear en el terreno desniveles que de otra forma no serían estables.

La ayuda al terreno, para mantener estable el desnivel requerido, puede hacerse con estructuras de contención de tipo muy variado. Son desde simples bulones, en el caso de taludes en roca, hasta obras masivas de hormigón para contener grandes desniveles en suelos.

En función de las Recomendaciones a considerar en el proyecto de obras marítimas y portuarias, se han distinguido las tres tipologías básicas de estructuras de contención que se describen a continuación y que se indican, esquemáticamente, en la Fig. 3.7.1.

Figura 3.7.1. Tipologías básicas de estructuras de contención



3.7.1.1 Muros de gravedad

Son estructuras de contención que soportan el empuje de tierras fundamentalmente mediante su propio peso.

Son ejemplos típicos los muelles de gravedad formados por bloques de hormigón o por cajones prefabricados.

También entrarían en este grupo los muros de hormigón armado que, aún con estructura aligerada, soportan el empuje con la ayuda del peso de las tierras que actúan sobre su losa de talón o sobre bandejas a media altura o según otras disposiciones estructurales.

Los muros de gravedad pueden apoyarse en el terreno mediante cimentaciones superficiales en forma de zapata corrida o mediante cimentaciones profundas. En cualquier caso, los principios generales cuya aplicación se

recomienda en los apartados 3.5 y 3.6 de esta ROM, correspondientes a cimentaciones, son aplicables para el estudio de estas estructuras de contención.

3.7.1.2 Muros pantalla

Son estructuras de contención que reciben directamente el empuje del terreno y lo soportan mediante el empotramiento de su pie y mediante eventuales anclajes próximos a su cabeza.

Son ejemplos típicos de estas estructuras los muelles de tablestacas hincadas o los muros de contención formados por pantallas continuas de hormigón armado o por pilotes próximos.

Los muelles (o los muros) formados por recintos de tablestacas son un caso especial, ya que participan del carácter de las pantallas flexibles en algunos aspectos locales, aunque en el conjunto también tienen aspectos en común con los muros de gravedad.

3.7.1.3 Entibaciones

Se clasificarían en este grupo aquellas estructuras de contención en las que, aprovechando dos planos próximos de excavación, se transmiten las cargas de uno a otro mediante elementos estructurales trabajando principalmente a compresión (puntales, codales, etc.).

El ejemplo más característico es la excavación en zanja. En ella, a medida que se avanza la excavación, el revestimiento de ambas paredes se acodala entre sí manteniendo la estabilidad del conjunto.

La característica fundamental de este tipo de estructuras es el escaso movimiento permitido, ya que en general los puntales son rígidos comparados con el terreno, ya sea por su amplia sección transversal o por su escasa longitud.

3.7.2 Valores límites del empuje

El empuje entre el terreno y la estructura de contención depende, en primera instancia y como variable fundamental, del movimiento relativo entre el terreno y la estructura.

Cuando la estructura de contención se separa del terreno de trasdós, el empuje del terreno disminuye y, para un desplazamiento relativo suficientemente amplio, llega a agotar su capacidad resistente rompiéndose según ciertas superficies de deslizamiento. En el estado límite de rotura del terreno de trasdós, el empuje sobre el muro alcanza un valor mínimo conocido como “empuje activo”.

De modo semejante, cuando el muro se mueve contra el terreno de manera que éste le ayude a soportar cargas exteriores (empujes de atraque, tiros de anclaje, etc.), el empuje aumenta a medida que lo hace la deformación. Existe también un límite al empuje que puede movilizarse. Este límite está controlado, principalmente, por la resistencia del terreno y se conoce con el nombre de “empuje pasivo”.

En aquellos suelos que exhiben resistencia de pico, y que por lo tanto disminuyen su resistencia al corte al aumentar la deformación, es posible que existan unos estados de deformación intermedios para los cuales se alcanza un empuje aún más bajo que el empuje activo o un empuje aún más alto que el empuje pasivo. En esta ROM se entenderán como valores límites (activo y pasivo) aquéllos que corresponden a grandes deformaciones, más allá de las necesarias para rebasar la posible resistencia de pico.

Para deformaciones relativas pequeñas, tales como las que puedan darse en muros en cuya coronación haya estructuras rígidas (muros de sótanos de edificios por ejemplo) que impidan el movimiento o que por alguna otra disposición estructural no puedan moverse respecto al terreno, el empuje será próximo al “empuje al repo-

so". Este concepto teórico correspondería al caso hipotético de movimiento relativo nulo entre la estructura de contención y el relleno de su trasdós.

En la Fig. 3.7.2 se incluye un ejemplo que ilustra la variación del coeficiente de empuje (concepto que se definirá más adelante) en función del giro de un hipotético muro que soporta un relleno granular.

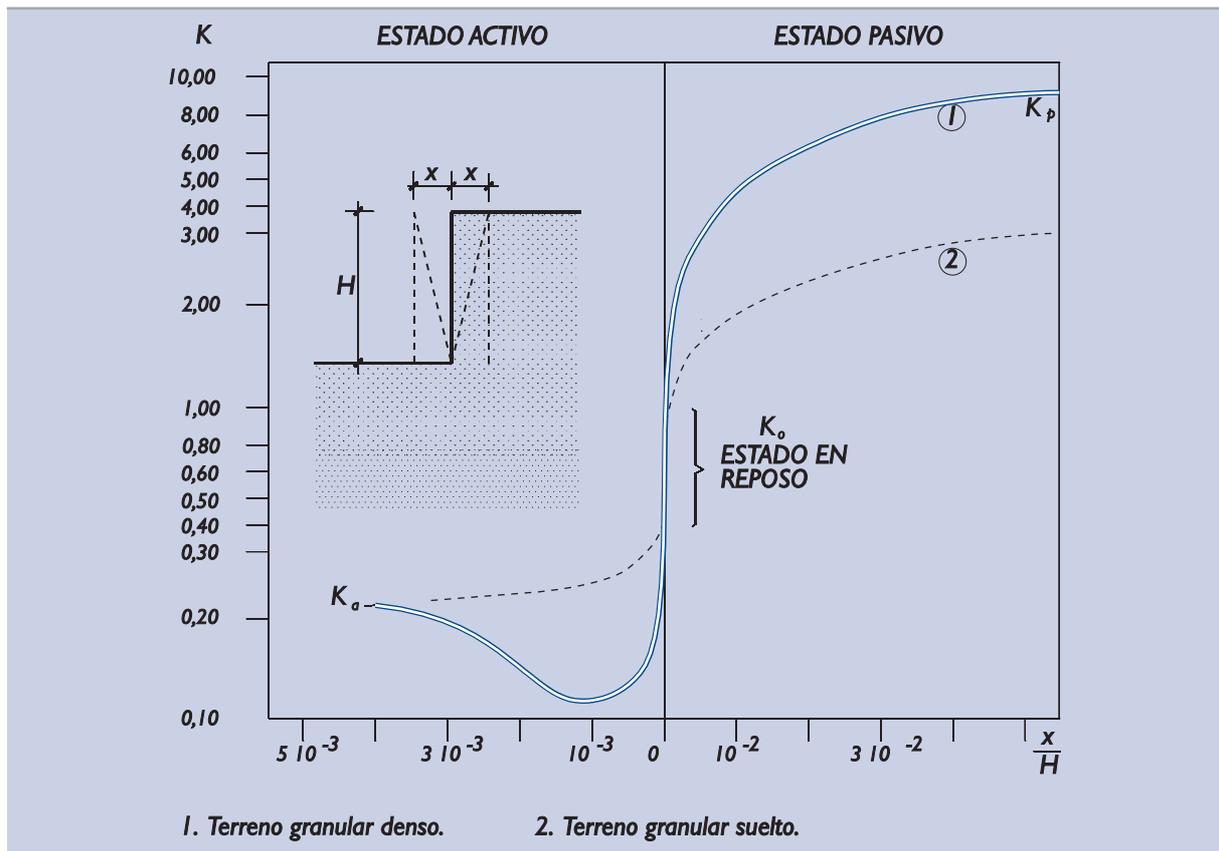
En esa figura se indican también valores típicos de la rotación necesaria para movilizar los empujes límites en otros terrenos.

Otras experiencias indican que los movimientos necesarios para provocar el estado límite del empuje activo en terrenos granulares de densidad media son del orden de magnitud siguientes:

Rotación alrededor de la cabeza	=	0,002 H
Rotación alrededor del pie	=	0,005 H
Traslación horizontal	=	0,001 H

siendo H la altura del muro.

Figura 3.7.2. Esquema de la relación entre empuje y movimiento



Tipo de Terreno	Rotación x/H	
	E. Activo	E. Pasivo
Granular denso	10^{-3}	$2 \cdot 10^{-2}$
Granular suelto	$4 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-2}$
Cohesivo duro	10^{-2}	$2 \cdot 10^{-2}$
Cohesivo blando	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$

La mayor parte de los cálculos que se mencionan en esta ROM se refieren a comprobaciones de Estados Límite Últimos en los que se supone que el terreno se rompe y, por lo tanto, en la mayoría de los cálculos será necesario calcular los valores límites de los empujes.

En aquellos cálculos asociados con la comprobación de Estados Límite de Servicio y en aquellos otros cálculos asociados a comprobaciones de modos de fallo de tipo estructural, puede ser necesario considerar situaciones de empuje intermedias.

3.7.3 Simplificaciones necesarias para el cálculo de empujes

Los procedimientos simplificados que se indican en esta ROM permiten calcular empujes en situaciones de geometría relativamente simples y por ese motivo es necesario hacer ciertas simplificaciones del problema real de manera que se faciliten los cálculos posteriores.

En primer lugar y salvo algunas consideraciones que se hacen más adelante (apartado 3.7.9), el problema del cálculo del empuje será bidimensional. Para ello el ingeniero considerará cuantas secciones planas verticales sean necesarias para evaluar los empujes en distintas partes de la obra.

Tras esta simplificación el ingeniero tendrá que hacer otras relativas a la geometría del trasdós, a la geometría del terreno y a la inclinación de los empujes. En los apartados que siguen se dan orientaciones sobre procedimientos adecuados en algunos casos concretos. Estas simplificaciones pueden estar ligadas entre sí. La forma de simplificar el paramento de trasdós afectará a la hipótesis relativa al ángulo de inclinación de los empujes.

Finalmente el ingeniero tendrá que realizar algunas simplificaciones adicionales que se irán comentando en cada caso particular.

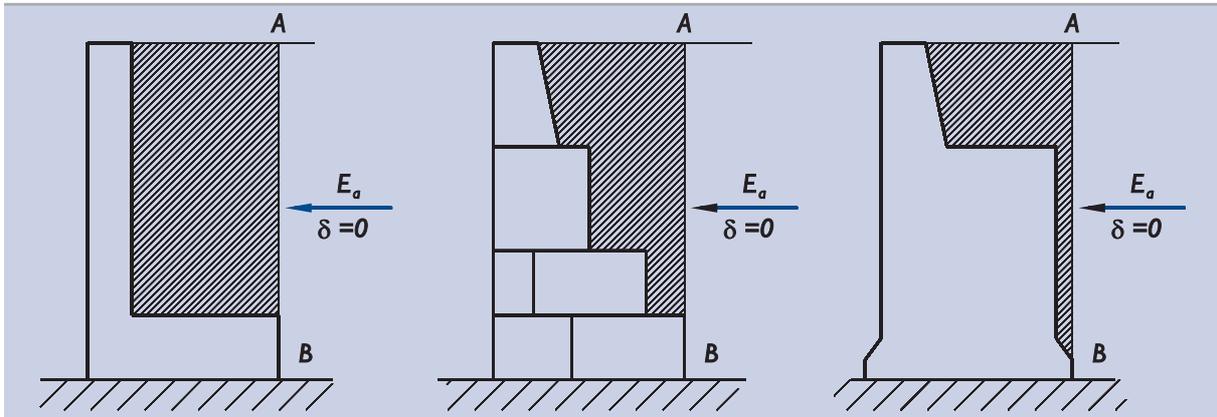
3.7.3.1 Geometría del trasdós del muro

Las soluciones existentes sobre el cálculo de empujes están deducidas, en general, de ciertas teorías en las que la superficie de contacto entre el muro y las tierras es plana. Las superficies quebradas que ocurren en los casos reales deben transformarse, aunque sea por tramos, en superficies planas equivalentes de manera que el cálculo posterior sea más sencillo.

Se considera admisible la sustitución del paramento de trasdós real por otro trasdós virtual plano y vertical que pasa por el talón trasero del muro. El terreno situado entre ese plano y el paramento real del trasdós será considerado como parte del propio muro. Esta situación se representa de manera esquemática en la Fig. 3.7.3.

Cuando se haga esta simplificación habrá de suponerse después, en el cálculo de los empujes, que la componente efectiva del empuje del terreno es paralela a la superficie del terreno (horizontal en el caso del croquis mencionado). Suponer inclinaciones mayores podría conducir a resultados optimistas en el cálculo de empujes activos ⁽¹⁶⁾.

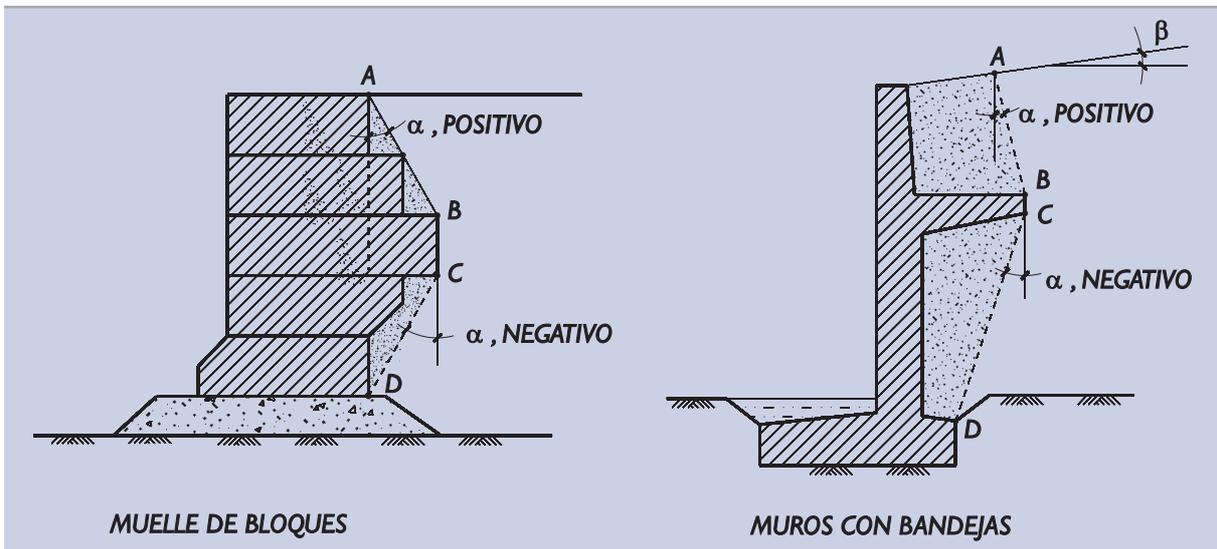
(16) Considérese, a modo de ejemplo, el muro en L que se indica en el croquis de la Fig. 3.7.3. En este caso, con el trasdós virtual vertical, se obtendría un gran peso equivalente del muro W_0 , que englobaría el de las tierras en la zona rayada, y un empuje horizontal E_a . Cuando se considera que el trasdós equivalente es quebrado, como se indica en la Fig. 3.7.4, y además el ángulo de inclinación del empuje sobre la parte inclinada del trasdós es $\delta_1 = \phi$, se obtiene un menor peso $W_1 < W_0$, un valor idéntico del empuje activo horizontal (método de Rankine) y una componente vertical del empuje que compensa exactamente al defecto de peso. Esto es $E_v = W_1 < W_0$. Las acciones contra la cimentación serían, en ambos casos, idénticas. Esto quiere decir que la hipótesis $\delta = 0$ en el trasdós virtual vertical conduce al empuje horizontal mínimo que puede darse y en consecuencia, cualquier valor de $\delta > 0$ que se suponga en el trasdós vertical virtual conducirá a resultados peligrosamente optimistas.

Figura 3.7.3. Sustitución de un trasdós quebrado por un plano vertical equivalente

Nota: La simplificación indicada puede ser excesivamente conservadora en el caso del muro (cajón) del esquema de la derecha. Ver texto.

Del mismo modo, la hipótesis indicada ($\delta = 0$) puede resultar demasiado severa en aquellos casos en los que el paramento virtual y el real quedan muy próximos (croquis de la derecha en la Fig. 3.7.3). En estos casos es recomendable que, en la mayor parte posible de la altura, el trasdós de cálculo coincida con el contacto real del muro con el terreno y, de esa forma, utilizar después los valores del ángulo “ δ ” que se recomiendan en 3.7.3.3.

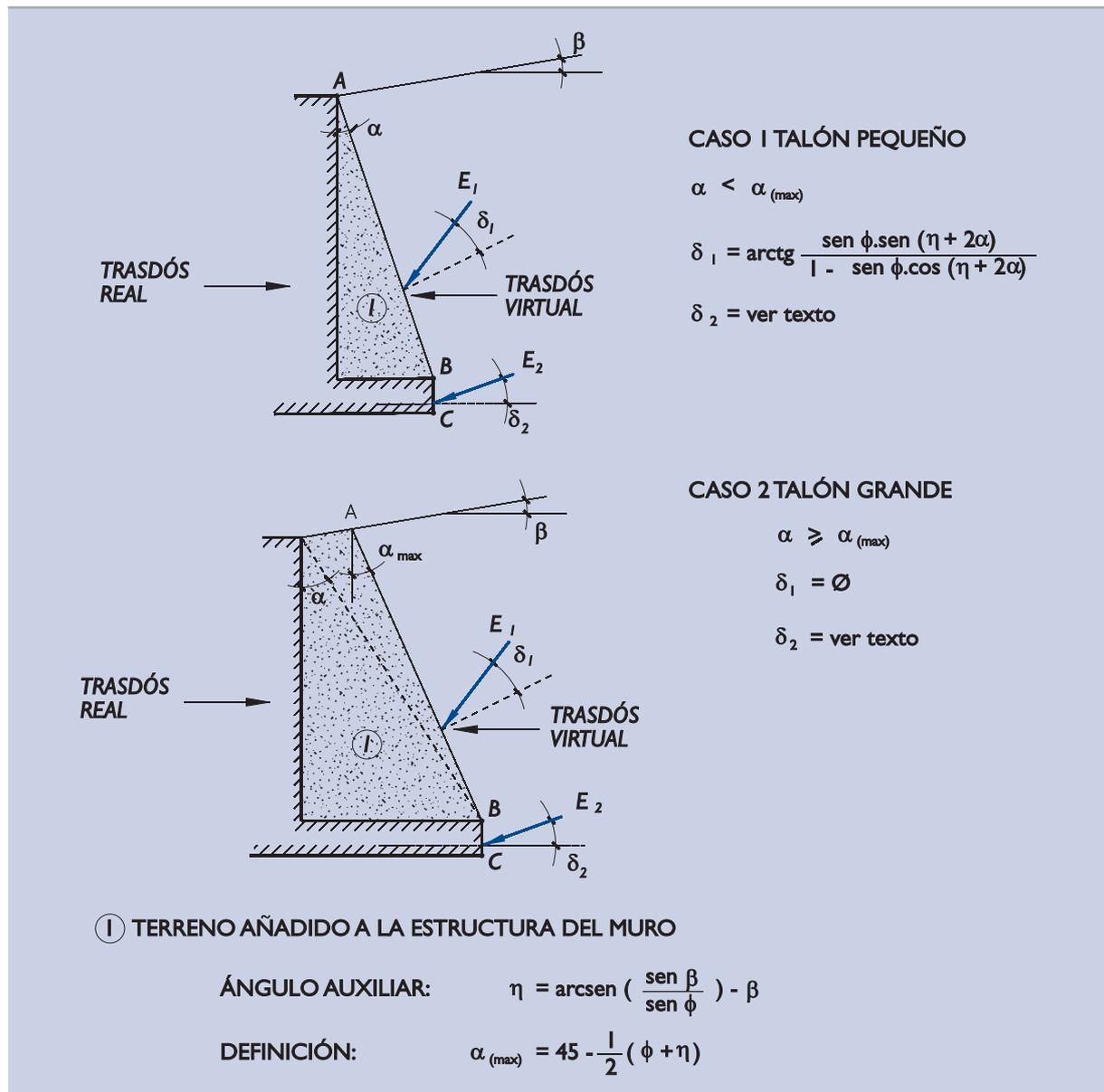
La simplificación anterior puede no ser aplicable a ciertos tipos de trasdós, tales como los indicados esquemáticamente en la Fig. 3.7.4 y, por otro lado, puede resultar algo grosera para aplicarla en aquellos casos en que se requiera conocer la distribución de empujes unitarios más cerca del contacto real del terreno con el trasdós de la estructura de contención.

Figura 3.7.4. Paramento virtual equivalente en muros de trasdós quebrado

El caso del muro en “L”, que es una tipología frecuente, puede asimilarse al de un muro del trasdós virtual plano, tal como se indica en la Fig. 3.7.5.

En caso de optarse por la simplificación indicada en esa figura, se deben suponer después, para el cálculo de los empujes efectivos del terreno correspondientes a la situación de empuje activo, las inclinaciones que se indican en la propia figura. Estas inclinaciones son compatibles con la teoría de empujes derivada de la hipótesis de plastificación activa de Rankine.

Figura 3.7.5. Trasdós equivalente en muros en L

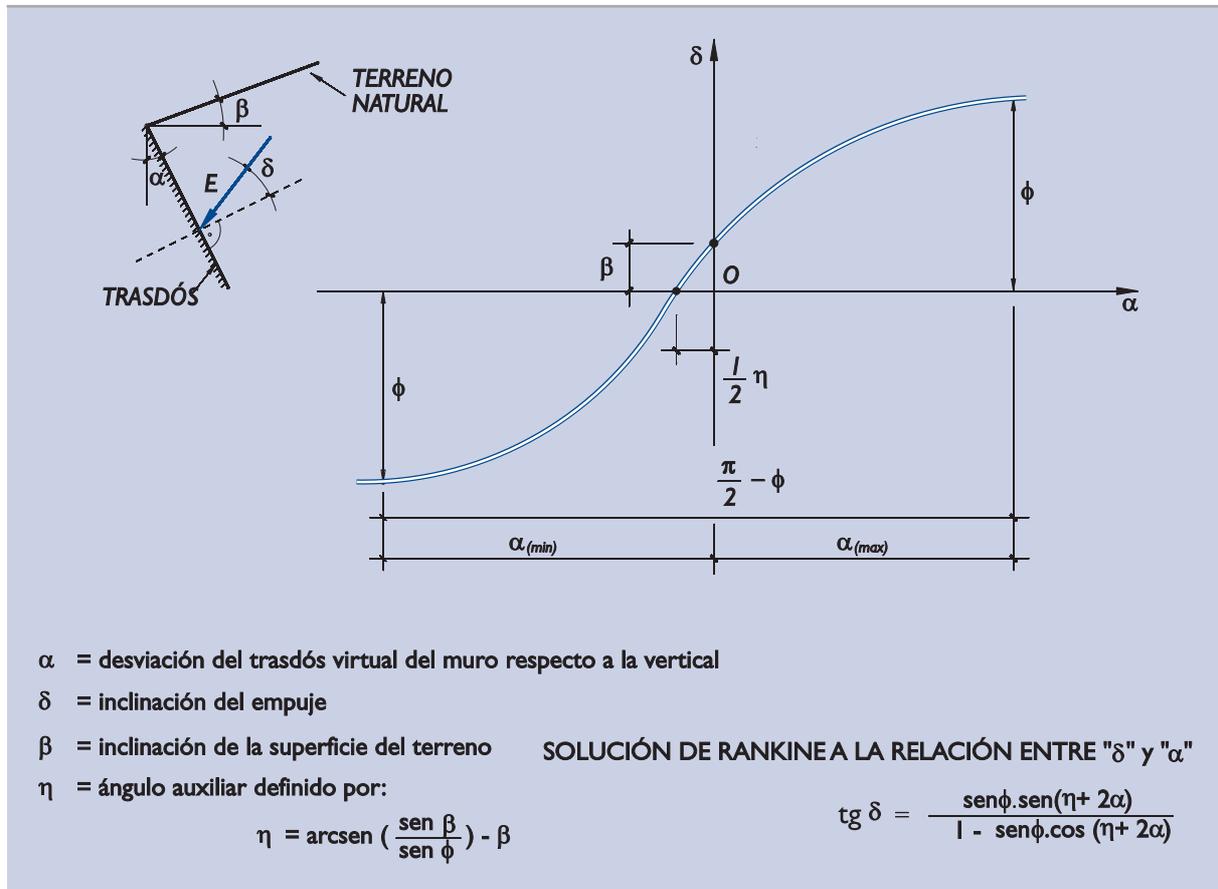


La relación que existe entre el ángulo de inclinación del empuje efectivo respecto a la normal al paramento virtual (ángulo δ) y los otros ángulos característicos del problema es una función analítica conocida cuya expresión gráfica se muestra en la Fig. 3.7.6.

En los tramos del muro donde el paramento del muro no se sustituye por un plano virtual equivalente (tramos BC en las figuras precedentes), el ángulo de inclinación del empuje debe determinarse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado que sigue.

En los muros en "L" es posible hacer paramentos virtuales equivalentes aún más próximos al paramento real que los indicados aquí. Se recomienda que, en cualquier caso, no se utilicen paramentos con ángulos de desviación respecto a la vertical (ángulos " α ") fuera del rango $\alpha_{m\acute{a}x} - \alpha_{m\acute{i}n}$ que se indica en la Fig. 3.7.6. No está comprobado que ángulos " α " fuera de ese rango conduzcan siempre a estimaciones realistas de los empujes.

Figura 3.7.6. Expresión gráfica de la Ley de Variación de la inclinación del empuje



3.7.3.2 Heterogeneidades del terreno

El terreno que existe alrededor del muro será, en general, heterogéneo y esto obligará a simplificar esa situación a fin de que el cálculo sea viable de manera suficientemente sencilla.

El terreno del trasdós de muros de contención debe representarse mediante zonas de resistencia y densidad homogéneas. A estos efectos la presencia del nivel freático puede suponer una causa de discontinuidad.

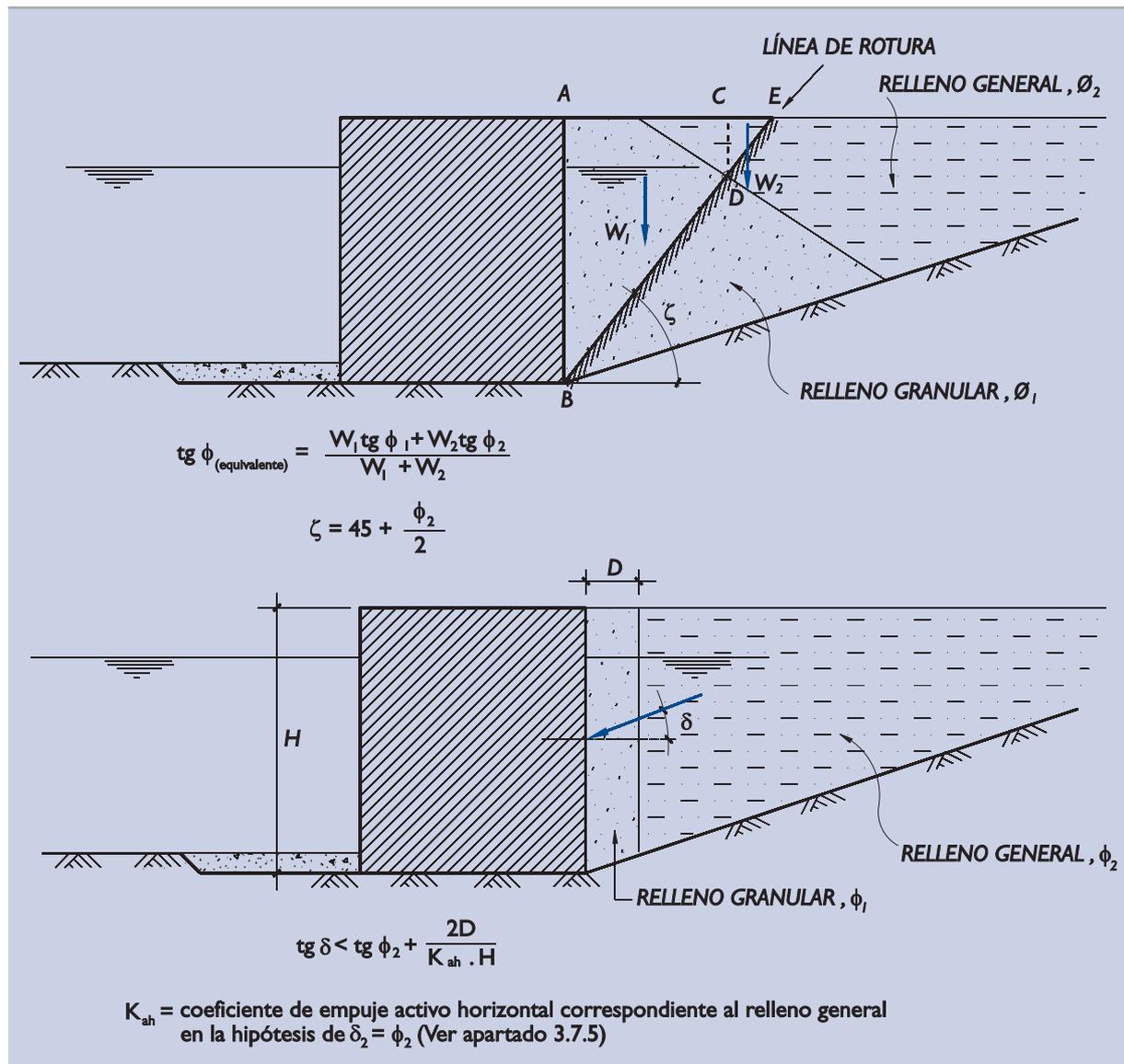
Al realizar las simplificaciones necesarias para representar el terreno real en las secciones planas del cálculo el ingeniero será prudente, asignando a los estratos o niveles más débiles los espesores mayores que razonablemente quepa esperar.

En aquellos casos en los que las variaciones geométricas del terreno puedan ser importantes y estén poco controladas, es recomendable hacer un análisis de sensibilidad repitiendo los cálculos con distintas geometrías del terreno.

3.7.3.2.1 RELLENO EN TALUD

Una heterogeneidad común en las obras portuarias es la indicada en la Fig. 3.7.7 (parte superior). Un relleno de mejor calidad está en las proximidades de la estructura de contención, mientras que otro general se construye después a mayor distancia, vertiendo sobre el talud dejado por el primero.

Figura 3.7.7. Esquema de algunas heterogeneidades típicas



En el procedimiento general de cálculo de empujes que más adelante se indica, ésta heterogeneidad no necesita ser simplificada. En los procedimientos de cálculo más sencillos, basados en los coeficientes de empuje (apartado 3.7.5), es preciso, sin embargo, simplificar el problema.

Tal como se indica en la propia figura, el problema puede simplificarse suponiendo un terreno único equivalente cuyo ángulo de rozamiento se obtiene como media ponderada de los correspondientes a los materiales que forman el trasdós. En esa ponderación se utilizarán los pesos efectivos, esto es, calculados con la densidad aparente por encima del nivel freático y con la densidad sumergida por debajo de él.

Si existiese cohesión, la media ponderada se haría con respecto a las distintas longitudes de los tramos de la línea de deslizamiento en cada terreno (longitudes BD y DE en el caso de la figura).

La línea base BE, utilizada para estas ponderaciones, intenta ser una primera aproximación al plano de rotura del terreno en la situación de empuje activo. Una vez obtenido el valor de $\phi_{\text{equivalente}}$, el ángulo de inclinación de esa línea se puede aproximar algo mejor, utilizando como inclinación de esta línea base, el ángulo:

$$\zeta = 45^\circ + \frac{1}{2}\phi_{\text{equivalente}}$$

Esta iteración podrá mejorar la estimación del ángulo de rozamiento buscado.

Esta simplificación dará lugar a errores que, en general, estarán del lado de la seguridad. El empuje activo calculado con el terreno equivalente será en general mayor y estará situado algo más alto que el correspondiente a un cálculo más preciso.

En caso de existir más de dos terrenos puede seguirse un procedimiento similar, utilizando como línea base la recta inclinada un ángulo $45^\circ + (\phi/2)$, donde ϕ es el ángulo de rozamiento del terreno más flojo y que después, mediante un cálculo iterativo, puede aproximarse al ángulo de rozamiento equivalente que resulte de la ponderación.

En caso de utilizarse esta simplificación en el cálculo de empujes pasivos se puede seguir un procedimiento similar, aunque en este caso la inclinación de la línea base para hacer interpolación debe ser:

$$\zeta = 45^\circ - \frac{\phi_1}{2}$$

donde ϕ_1 es el ángulo de rozamiento del terreno más resistente y que después, en sucesivas iteraciones, puede aproximarse al $\phi_{\text{equivalente}}$ que resulte de la ponderación.

En cualquier caso, el ángulo “ δ ” a utilizar en los cálculos debe ser el que corresponda al material de contacto entre el muro y el terreno del trasdós.

3.7.3.2 RELLENO EN FRANJA ESTRECHA

Una situación que puede darse con alguna frecuencia es la indicada en la parte inferior de la Fig. 3.7.7. Únicamente en una banda estrecha en la zona de contacto del muro contra el terreno se dispone un material granular más resistente.

En esos casos es posible utilizar un procedimiento similar al descrito en el apartado anterior para calcular el ángulo de rozamiento equivalente. Si la franja de material granular es estrecha ($D \ll H$) la resistencia del terreno equivalente será, a efectos prácticos, la correspondiente al relleno general.

El ángulo “ δ ” de rozamiento tierras-muro, sin embargo, puede suponerse controlado por el material granular, aunque debe cumplir la limitación indicada en la figura, así como las limitaciones generales que se indican en el apartado 3.7.3.3 que sigue.

Si esta última simplificación se utilizara para cálculos de empuje pasivo, el coeficiente K_{ah} que se menciona en la figura debe sustituirse por el coeficiente K_{ph} correspondiente al empuje pasivo.

3.7.3.3 Inclinación de los empujes

En esta ROM se define la inclinación del empuje efectivo de las tierras mediante el ángulo “ δ ” que forman entre sí el empuje y la normal al paramento. Ese ángulo se considera positivo cuando la acción del terreno contra el muro empuja a éste más hacia abajo que lo que indica la normal. El sentido positivo de “ δ ” se indica en varias figuras de este apartado 3.7.

El valor de “ δ ” es, en general, un parámetro que el ingeniero debe decidir siguiendo las recomendaciones que se dan a continuación.

En el cálculo de empujes activos y en términos generales, el resultado será tanto más optimista (menor empuje horizontal y dirección del empuje más favorable frente a los distintos Estados Límite Últimos) cuanto mayor sea el ángulo “ δ ” supuesto. Por ese motivo el ingeniero debe utilizar en sus cálculos de empujes activos valores de “ δ ” moderados y que, en cualquier caso, no superen el ángulo de rozamiento del terreno con el trasdós del muro.

En el cálculo de los empujes pasivos el valor de “ δ ” es menos claro, ya que puede estar condicionado por la dirección de las fuerzas externas que causan la movilización del empuje pasivo. En pantallas de anclaje, por ejemplo, el tiro del anclaje condiciona la dirección del empuje.

El empuje pasivo, en general, será tanto mayor cuanto menor sea el ángulo “ δ ”. Normalmente el valor de “ δ ” será negativo, pero en cada obra deberá comprobarse que el desplazamiento relativo necesario para que se produzca esa dirección del empuje es compatible con las coacciones externas.

En cualquier caso, sea el empuje límite activo o pasivo, el valor absoluto de “ δ ” no superará el ángulo de resistencia del contacto tierras-muro. En la Tabla 3.7.1 se indican los valores orientativos de ese ángulo que el ingeniero puede utilizar a falta de mejor información. Si la estructura o el terreno están sujetos a vibraciones importantes deberá considerarse $\delta = 0$.

En aquellos cálculos en los que el paramento del muro sea virtual (resultado de una simplificación del trasdós real quebrado) y, por lo tanto, esté representado por una línea dentro del terreno, se tendrán en cuenta las limitaciones indicadas en el apartado 3.7.3.1. También se tendrán en cuenta las limitaciones al valor de “ δ ” indicadas en 3.7.3.2, debidas a simplificaciones previas de las posibles heterogeneidades del terreno.

En los cálculos de empuje al reposo la dirección del empuje debe suponerse paralela a la superficie del terreno. Esta regla general puede tener excepciones que el ingeniero puede justificar.

Tabla 3.7.1. Valores máximos del ángulo de rozamiento entre el paramento del muro y el terreno, en función del ángulo de rozamiento del terreno, ϕ

	Suelos granulares y suelos cohesivos a largo plazo	Suelos cohesivos a corto plazo
Paramentos perfectamente lisos (*)	0	0
Acero	$\phi \cdot (2/3)$	0
Hormigón prefabricado/otros tipos de fábricas/escolleras/madera	$\phi \cdot (2/3)$	0
Hormigonado contra el terreno	ϕ	0

* Tratados con asfalto, alquitrán, betún, etc.

3.7.4 Método general de cálculo del empuje activo

La situación de empuje activo es un estado de rotura del terreno y, por lo tanto, puede analizarse mediante los procedimientos habituales de la estática, una vez se conocen los distintos datos que caracterizan el problema y después de realizar las hipótesis complementarias que sean necesarias para completar su determinación.

3.7.4.1 Geometría del problema

La sección bidimensional de estudio quedará definida por un trasdós de muro formado por una línea continua suavizada que coincida con el trasdós real o se aproxime a él según se indica en el apartado 3.7.3.1. La otra línea que delimita el problema será la superficie externa del terreno en el trasdós del muro, que puede tener cualquier forma.

El terreno del trasdós quedará representado por una serie de materiales homogéneos distribuidos en distintas zonas que se habrán definido siguiendo los criterios indicados en el apartado 3.7.3.2.

Los ángulos de orientación de la inclinación de los empujes respecto a la normal del paramento del muro en cada tramo (ángulo “ δ ”) serán acordes con lo especificado en 3.7.3.3.

Otro elemento esencial necesario para el cálculo de empujes será la definición del estado del agua en el trasdós del muro. Para hacer esa definición será necesario realizar un análisis previo de la red de filtración que pudiera existir. Para ello se seguirán las recomendaciones que se indican en el apartado que sigue.

3.7.4.2 Red de filtración

La filtración en el trasdós del muro puede estar originada por distintas causas. En las zonas portuarias una de las causas dominantes puede ser la variación del nivel del mar debida a las mareas y a la acción del oleaje.

La amplitud de los desniveles de agua (pérdidas totales de carga entre uno y otro lado de la red de filtración) debe estimarse siguiendo las recomendaciones que se indican en la Tabla 3.4.1. de esta ROM.

La red de filtración correspondiente debe obtenerse siguiendo los principios generales y las recomendaciones que se indican en el apartado 3.4 de esta ROM 0.5.

Para aplicar el método general de cálculo que se describe a continuación será necesario conocer la presión intersticial existente en todos los puntos del trasdós.

3.7.4.3 Cargas externas

Las cargas externas que puedan actuar sobre el trasdós del muro deben figurar con sus valores de cálculo, esto es, los valores característicos afectados por los coeficientes de combinación que correspondan a la situación de proyecto que se estudie y afectados por el coeficiente de mayoración correspondiente.

Para aquellos cálculos del empuje activo cuyos resultados hayan de utilizarse en el análisis de Estados Límite Últimos no geotécnicos (aquéllos en los que la resistencia del terreno juega un papel secundario), podrán utilizarse otros valores de cálculo de las acciones utilizando los coeficientes de mayoración o minoración que corresponda.

Las cargas puntuales que pudieran existir se transforman en cargas lineales equivalentes dividiendo la carga total entre una longitud igual a la distancia de la carga al trasdós del muro.

Las cargas lineales que actúen según una línea paralela a la coronación del muro, de longitud “L” y separadas del paramento de trasdós una distancia “D”, deben suponerse actuando sobre una longitud indefinida. En ese caso pueden reducirse multiplicándolas por el factor:

$$f = \frac{L}{L + D}$$

3.7.4.4 Datos del terreno

Cada terreno que forme el relleno del trasdós del muro debe ser caracterizado para conocer su peso específico, tanto en la zona emergida como en la sumergida, y su resistencia al corte.

Estos parámetros pueden variar con el tiempo. Los parámetros a utilizar en los cálculos deben corresponderse temporalmente con la situación de proyecto analizada.

Los rellenos de trasdós de las estructuras de contención importantes serán, en general, de tipo granular, de consolidación rápida, y por lo tanto el cálculo del empuje activo se debe efectuar con los parámetros resistentes en presiones efectivas que simulan la resistencia a largo plazo.

Cuando el trasdós del muro de contención sea un terreno arcilloso preexistente (muros pantalla excavados en zanja, por ejemplo) el empuje activo sobre el muro será, en general, creciente con el tiempo y, por ese motivo, normalmente no será necesario comprobar otras situaciones más que la correspondiente a largo plazo.

Las obras de contención de empuje de tierras que se trasdosan con rellenos que puedan tardar en consolidar un tiempo apreciable necesitan un cálculo especial correspondiente a una situación de corto plazo, ya que esa situación conduciría en general a valores más altos del empuje activo.

El caso extremo de consolidación nula de un relleno sumergido puede simularse suponiendo un ángulo de rozamiento nulo y una cohesión igual a la resistencia al corte sin drenaje. En el apartado 4.9 de esta ROM se indican algunos valores típicos de resistencia al corte sin drenaje de rellenos sumergidos poco después de su colocación. Estos valores pueden guiar al ingeniero en cálculos previos. Cuando este aspecto sea condicionante en el proyecto de la estructura en consideración, es recomendable hacer ensayos específicos para determinar la resistencia del relleno.

3.7.4.5 Tramos de cálculo

La geometría del problema, la red de filtración correspondiente, las cargas externas y las propiedades del terreno deben permitir la configuración del problema correspondiente, tal como se indica de manera esquemática en la Fig. 3.7.8.

El trasdós del muro quedará definido por una serie de puntos (A, B, C y D en la figura mencionada) que separan o bien contactos de distintos terrenos o bien quiebros del paramento del muro. La intersección del trasdós del muro con el nivel freático puede considerarse como un punto adicional en esta división, aunque esto no es estrictamente necesario ni añade más precisión al valor del empuje calculado.

La situación de la línea de acción del empuje, sin embargo, será tanto más precisa cuantos más tramos de cálculo se establecen en el trasdós del muro. A estos efectos puede ser recomendable intercalar más puntos entre los estrictamente necesarios.

El cálculo del empuje se hará por tramos, comenzando por la zona superior. El cálculo correspondiente a cada tramo se debe realizar según se indica en el apartado siguiente. Ese cálculo, como allí se indica, determina el empuje total y por lo tanto comprende el empuje causado por el agua. Por ese motivo en los ángulos de desviación del empuje total respecto a la normal al trasdós acotados en la Fig. 3.7.8, se utiliza la variable « θ » para distinguirlos de las inclinaciones « δ » que corresponden a los empujes efectivos. La relación entre estos dos ángulos se explica en el apartado siguiente.

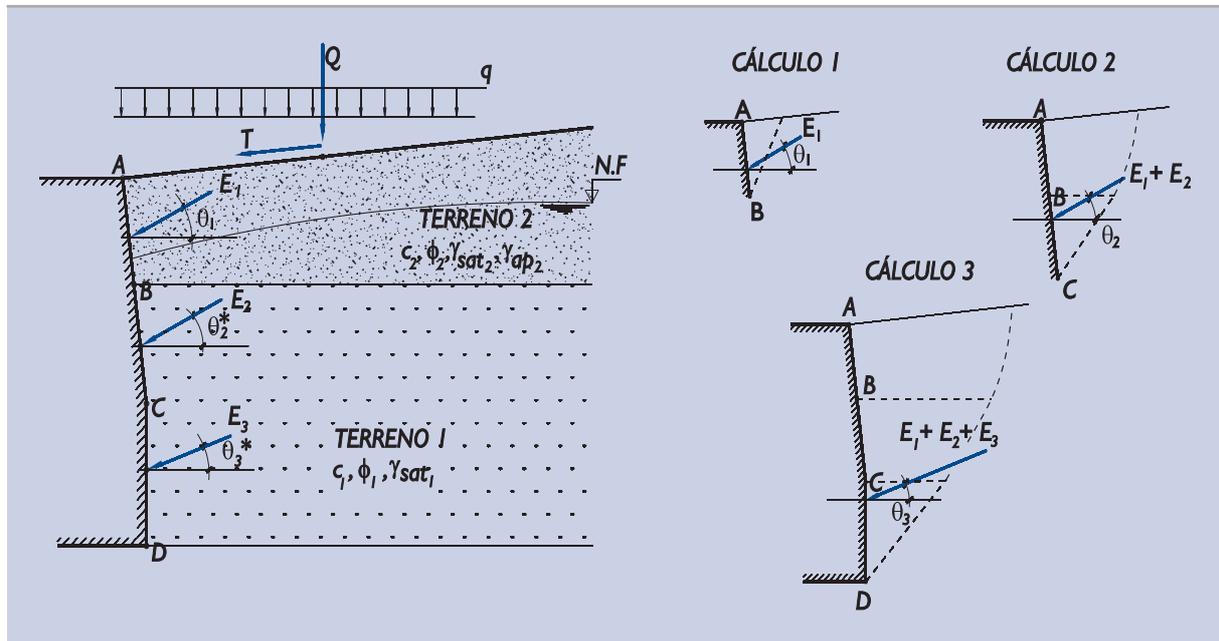
El primer cálculo permitirá la definición del empuje E_1 , el segundo cálculo permitirá la definición de la suma vectorial de E_1 y E_2 y, por lo tanto, mediante la correspondiente resta, se puede obtener el valor de E_2 . Este proceso repetido en cada cálculo sucesivo permitirá conocer cada uno de los empujes.

La situación de cada empuje (punto de intersección de su línea de acción con el trasdós del muro) no queda definida con estos cálculos, por lo que es necesario hacer alguna hipótesis complementaria.

El empuje en el primer tramo debe suponerse situado a una distancia comprendida entre 1/2 de la longitud del tramo (caso de existir sobrecargas importantes) y 2/3 de esa longitud (si no existen sobrecargas próximas que afectan a E_1).

El empuje de cada tramo siguiente se puede suponer aplicado en el centro del tramo. El error que esto supone quedará en general del lado de la seguridad y será tanto menor cuanto más cortos sean los tramos de cálculo.

Figura 3.7.8. Esquema del método general de cálculo del empuje activo



Nota: Los ángulos θ están marcados respecto a la horizontal.

3.7.4.6 Cálculo del empuje en cada tramo

El cálculo del empuje activo sobre un muro se indica esquemáticamente en la Fig. 3.7.9. El trasdós de ese muro podría corresponder al tramo AC de la parte superior del muro indicado en la Fig. 3.7.8. Representaría, por lo tanto, el cálculo n° 2 que habría de realizarse para obtener los empujes sobre aquel muro.

Para calcular el empuje total sobre el tramo AC es necesario tantear distintas líneas de rotura poligonales cuya pendiente, ζ , debe ser constante o creciente a medida que se sube de la base del muro, C, a la superficie del terreno, P. Después de tantear varias combinaciones se debe elegir aquélla que conduzca a un mayor empuje.

Aprovechando las intersecciones de esta línea de rotura con las líneas que delimitan las discontinuidades del terreno (separación de materiales, corte con el nivel freático) se definirán los puntos de quiebro de estas poligonales (puntos M y N en la figura).

Las verticales por los puntos de quiebro definirán una serie de rebanadas. El estudio del equilibrio de cada una de esas rebanadas permitirá obtener el empuje que se busca.

En el estudio del equilibrio de cada rebanada se considerarán seis fuerzas, tal como se indica en la figura que se comenta, y se comenzará el cálculo analizando la rebanada superior.

La fuerza n° 1 es el empuje de la rebanada anterior y por lo tanto en la primera rebanada será nulo.

La fuerza n° 2 será la suma del peso total de la rebanada y de las cargas externas que puedan actuar en su cabeza o en su interior. Para calcular el peso total de cada rebanada se deben utilizar las densidades aparentes en la zona superior al nivel freático y las densidades saturadas por debajo de él.

La fuerza n° 3 es el producto de la posible cohesión por la longitud de la base de la rebanada y la n° 4 la subpresión que actúa en esa misma base.

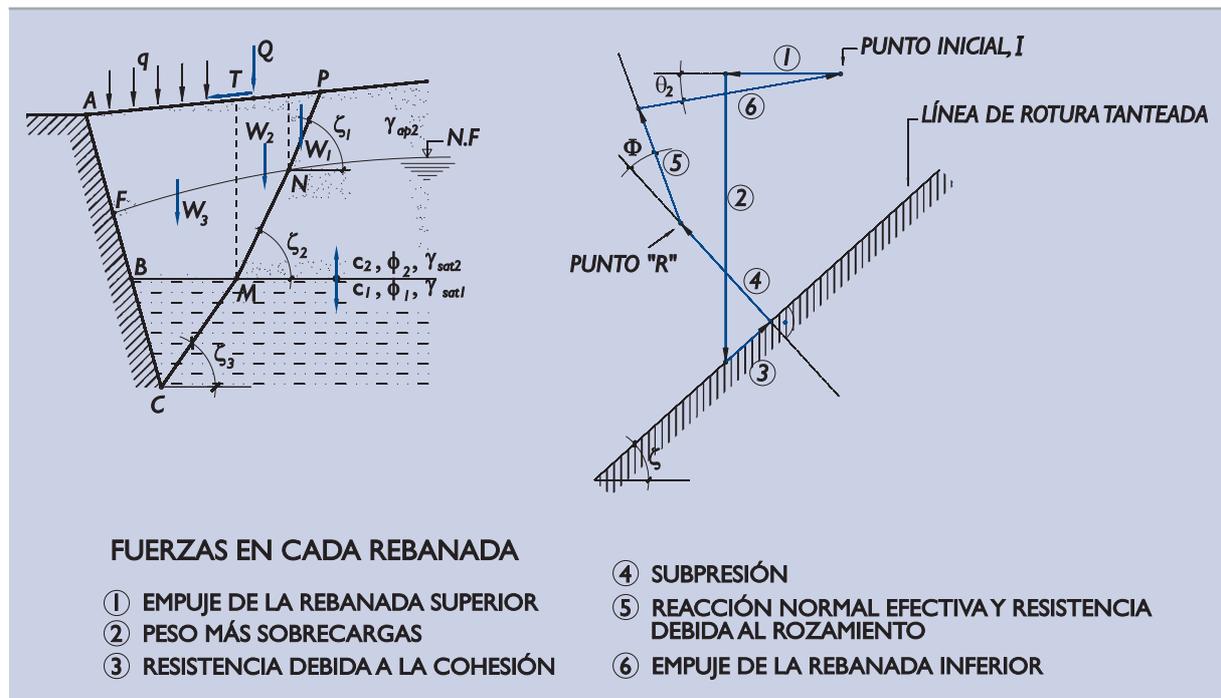
Después de componer las fuerzas n°s 1 a 4 partiendo del punto inicial «I» se llega al punto “R”.

Las fuerzas que cierran el polígono son la reacción normal efectiva en la base de la línea de rotura, cuya dirección se conoce (fuerza n° 5 del esquema) y el empuje de la rebanada siguiente, sobre cuya dirección ha de hacerse alguna hipótesis.

En el croquis de la Fig. 3.7.9 se ha indicado que la acción de la rebanada anterior es horizontal; así deben suponerse todos los empujes entre rebanadas, ya que la experiencia indica que esa hipótesis es suficientemente conservadora.

Únicamente cuando se esté calculando la última rebanada para obtener ya el empuje sobre el muro, se debe suponer que el empuje está desviado un ángulo θ respecto a la horizontal que puede ser distinto de cero.

Figura 3.7.9. Cálculo del empuje activo sobre el tramo AC



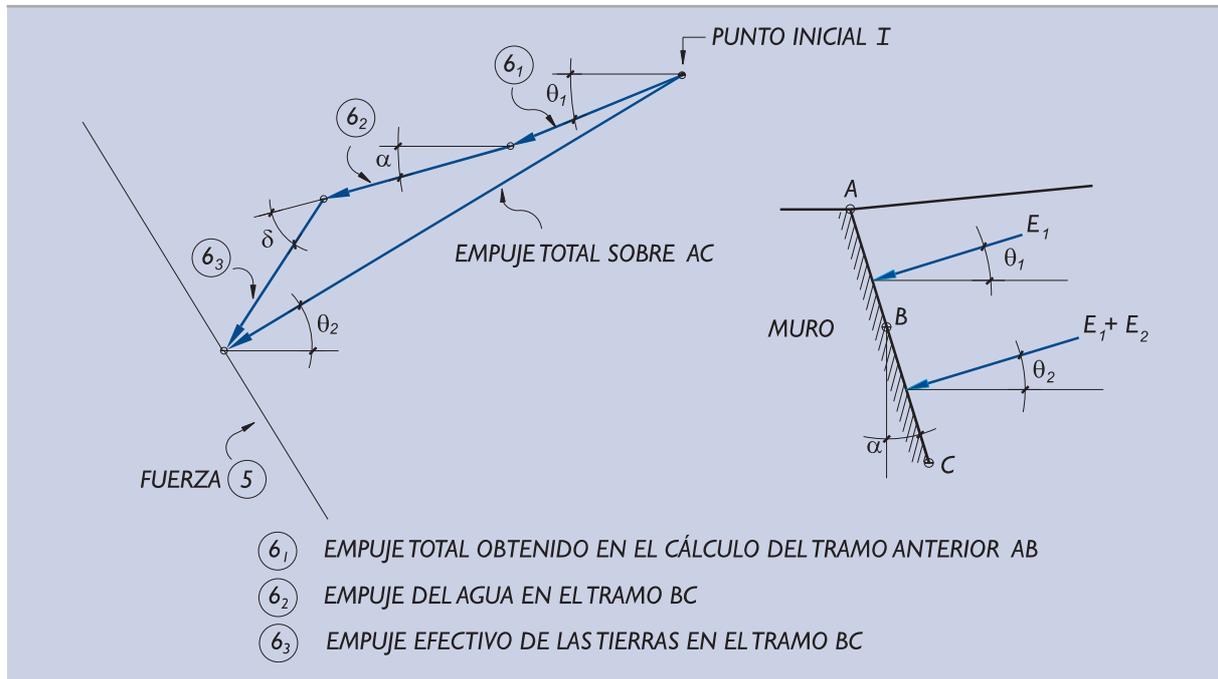
ÁNGULO DE INCLINACIÓN DEL EMPUJE TOTAL

El ángulo de inclinación respecto a la horizontal del empuje total en el muro AC se ha señalado en la Fig. 3.7.9 con el símbolo θ_2 . El subíndice trata de indicar que se trata del cálculo n° 2 que se necesita para obtener el empuje sobre el muro de la Fig. 3.7.8.

Previamente, por lo tanto, se supone que existe un cálculo que ha permitido determinar el empuje total sobre el tramo precedente, AB y su orientación θ_1 .

En la Fig. 3.7.10 se indica esquemáticamente un procedimiento para determinar el ángulo θ_2 del empuje total sobre el muro AC que se quiere determinar.

Figura 3.7.10. Determinación de la inclinación del empuje



El empuje total sobre el tramo anterior AB es conocido del cálculo precedente. El empuje del agua en BC se debe determinar con los datos de presión intersticial en el paramento del muro. La tercera componente del empuje total es el empuje efectivo sobre el tramo BC, que debe de formar con la normal al paramento, en ese tramo, el ángulo “ δ ” correspondiente y que debe ser definido de acuerdo con las recomendaciones que se indican en el apartado 3.7.3.3.

Con esta construcción gráfica o con su expresión analítica equivalente, se puede obtener, por lo tanto, la orientación del empuje total del terreno sobre el tramo en cuestión.

CÁLCULO AUXILIAR DEL EMPUJE DEL AGUA

El procedimiento general de cálculo descrito en este apartado determina el valor total del empuje, esto es, la parte correspondiente al empuje efectivo del terreno y la parte correspondiente al agua intersticial.

Es preciso, sin embargo, un cálculo auxiliar del empuje debido al agua intersticial en cada tramo de muro únicamente al objeto de determinar el ángulo de orientación del empuje total. El empuje del agua se puede obtener como integración del valor de la presión intersticial en el contacto muro-terreno extendida a lo largo de dicho contacto. Normalmente el trasdós de los muros, al menos en las inmediaciones del contacto tierras-muro, está formado por un material granular de permeabilidad alta donde el régimen de presiones es hidrostático. En esos casos el empuje del agua sobre cualquier tramo del contacto muro-terreno será sencillo (variación lineal de la presión del agua intersticial) y por lo tanto resultará fácil de integrar.

SIMPLIFICACIÓN EN CASOS DE RÉGIMEN HIDROSTÁTICO EN TODO EL TRASDÓS

Si todo el trasdós estuviese en régimen hidrostático, esto es, si el agua del trasdós estuviera en reposo, el método general precedente puede simplificarse calculando por un lado los empujes efectivos y después, por separado, los empujes del agua.

El cálculo de los empujes efectivos se realizaría tal como se ha dicho en el método general precedente pero eliminando la subpresión y utilizando la densidad sumergida para el cálculo de pesos.

La orientación de empujes entre rebanadas seguirá siendo, igual que antes, horizontal. Únicamente el empuje de la última rebanada con el paramento del muro tendrá la inclinación “ δ ” respecto al trasdós del muro.

Cuando el cálculo del empuje se realiza utilizando densidades sumergidas bajo el nivel freático, a los empujes efectivos resultantes ha de añadirse el empuje hidrostático sobre la pared del muro calculado de manera independiente.

El cálculo con densidades saturadas y subpresiones conduce a idéntico resultado que el cálculo con densidades sumergidas sin subpresiones. Por este motivo, el ingeniero optará por el método que le resulte más conveniente (generalmente será este segundo).

SIMPLIFICACIÓN EN CASO DE FILTRACIONES CON GRADIENTE UNIFORME

La filtración en el trasdós del muro da lugar a un gradiente vertical que en ocasiones puede suponerse constante en la zona de afección del cálculo del empuje, esto es, en la zona comprendida entre las posibles líneas de rotura y el paramento del trasdós del muro.

Esas situaciones pueden permitir un cálculo simplificado en el que el empuje total se considera separado en dos partes que se calculan independientemente, una es el empuje efectivo de las tierras y la otra es el empuje del agua.

El empuje efectivo de las tierras se calcularía tal como se indica en el procedimiento general descrito antes pero utilizando bajo el nivel freático un peso específico de cálculo:

$$\gamma_{\text{cálculo}} = \gamma' + I_v \cdot \gamma_w$$

donde γ' y γ_w son el peso específico sumergido del terreno y el peso específico del agua, respectivamente y donde I_v es el gradiente vertical del flujo del agua.

En este cálculo simplificado los empujes entre rebanadas se deben seguir suponiendo horizontales excepto en la última, la más próxima al muro, donde la acción contra el muro formará el ángulo “ δ ” correspondiente con la normal al paramento.

Este procedimiento de cálculo exige la determinación separada del empuje del agua intersticial. Este empuje se determinará integrando la ley de presiones intersticiales a lo largo del paramento del muro.

3.7.5 Métodos basados en el coeficiente de empuje activo

El método general descrito en el apartado precedente puede resultar laborioso ya que exige calcular varios tramos de un mismo muro y tantear diversas líneas de rotura para cada tramo hasta obtener un máximo del empuje.

Para facilitar los cálculos puede utilizarse el procedimiento que se describe a continuación basado en el concepto de coeficientes de empuje.

3.7.5.1 El concepto de coeficiente de empuje activo

La solución analítica de algunos problemas sencillos ha permitido saber que, cuando el relleno de trasdós es homogéneo, seco y granular y cuando además no existen sobrecargas en superficie, el empuje activo sobre el muro, E_{at} , que sería debido únicamente al peso de las tierras, es proporcional al peso específico del terreno, γ , y al cuadrado de su altura, h , esto es:

$$E_{at} = \frac{1}{2} \gamma K_a h^2$$

Al coeficiente de proporcionalidad K_a de esa expresión se le denomina coeficiente de empuje activo.

El paramento del muro sobre el que actúa este empuje tiene una longitud:

$$l = \frac{h}{\cos \alpha}$$

siendo “ α ” la desviación respecto a la vertical del plano del trasdós.

La derivada del empuje en la dirección del paramento del muro permite calcular la presión de contacto tierras-muro que se denominará empuje unitario:

$$e = \frac{\partial E_{at}}{\partial l} = \gamma h K_a \cdot \cos \alpha$$

El producto “ $\gamma \cdot h$ ” coincide con la tensión vertical que actuaría sobre un plano horizontal situado a una profundidad “ h ” si el terreno fuese horizontal. Por ese motivo se le denominará aquí σ_v , esto es:

$$\sigma_v = \gamma h$$

Con este convenio se puede definir como coeficiente de empuje activo al valor dado por:

$$K_a = \frac{e}{\sigma_v \cos \alpha}$$

Conviene reiterar que así como “ e ” es una tensión con un significado físico claro (compresión efectiva de tierras contra muro en el plano de trasdós), el significado de σ_v no lo es. En muros que soportan terrenos con superficie inclinada, la tensión vertical sobre un plano horizontal que pasa por el punto donde actúa “ e ” no es constante; varía con la distancia a la vertical que pasa por la coronación del muro y, por lo tanto, su valor en el trasdós del muro dependerá del ángulo “ α ”. La presión vertical σ_v es, únicamente, una presión de referencia conveniente por su facilidad de manejo.

Como más adelante se expone, el coeficiente de empuje activo depende de la resistencia del terreno, de la resistencia del contacto terreno-muro y de los ángulos de inclinación del trasdós del muro y de la superficie del terreno. El coeficiente de empuje activo no es, por tanto, una característica del terreno sino un parámetro de cálculo que está controlado fundamentalmente por la resistencia del terreno.

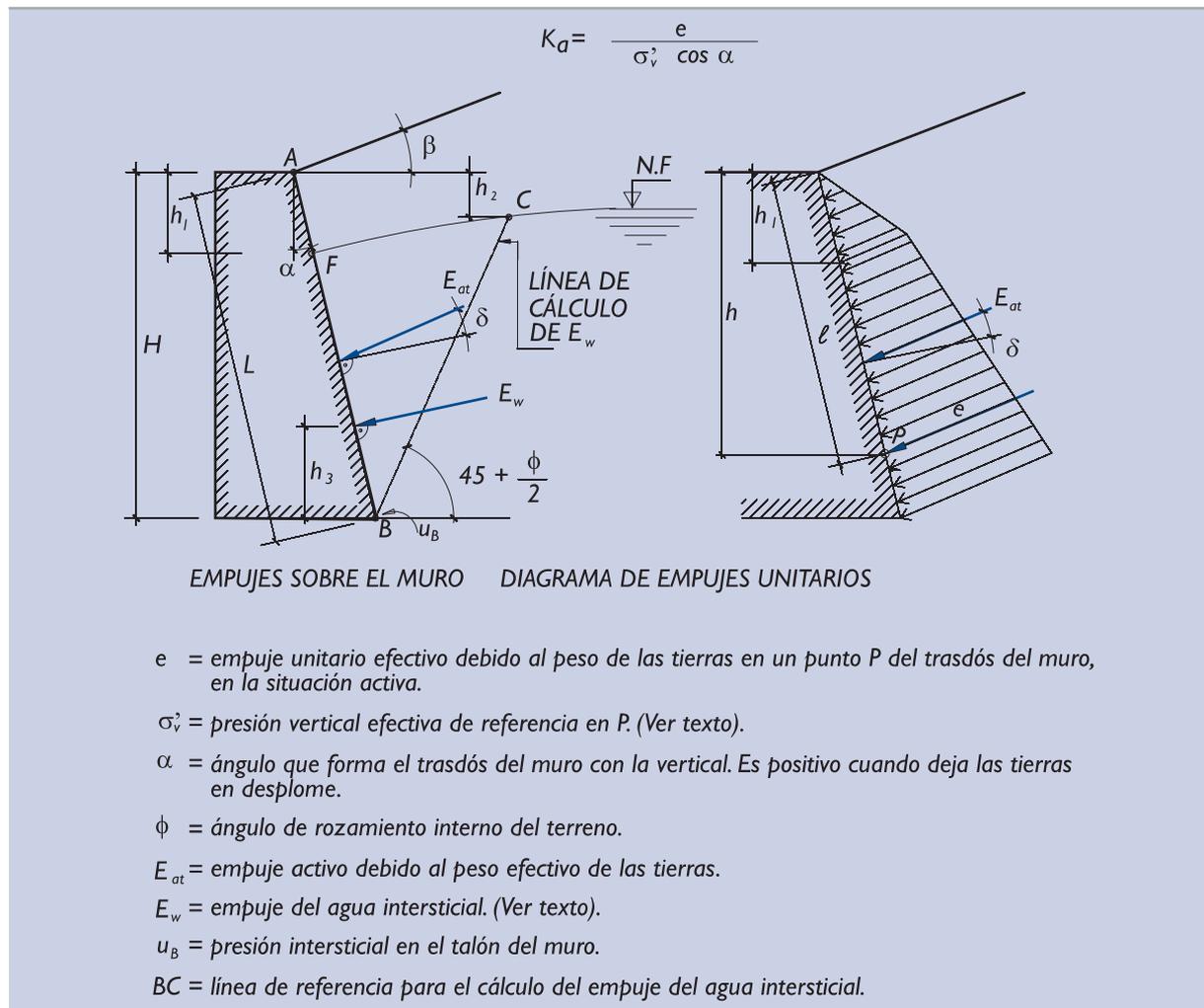
En lo que sigue se utilizará también el concepto de coeficiente de empuje activo horizontal y coeficiente de empuje activo vertical definidos por las expresiones:

$$\begin{aligned} K_{ah} &= K_a \cdot \cos(\sigma + \delta) \\ K_{av} &= K_a \cdot \sen(\sigma + \delta) \end{aligned}$$

donde α y δ miden las desviaciones del trasdós del muro respecto a la vertical y del empuje respecto a la normal al trasdós, tal como se indica en varias figuras de este apartado.

Por extensión de este concepto de empuje activo, se va a suponer en esta ROM que, en un problema con agua saturando parcialmente el trasdós de un muro, se cumple también una relación similar a la que se define en el concepto de empuje activo. Esta relación se indica en la Fig. 3.7.11.

Figura 3.7.11. Extensión del concepto de coeficientes de empuje activo de suelos granulares



Se supone que en este caso el terreno sigue siendo homogéneo y granular y sigue sin tener sobrecargas en superficie, de manera que el empuje activo es debido a dos causas: el peso efectivo del terreno y el empuje del agua intersticial.

Se supone, además, que el empuje horizontal del agua es el que resulta al integrar las presiones intersticiales a lo largo de una línea BC inclinada $45^\circ + \phi/2$ respecto a la horizontal, esto es:

$$E_{hw} = \frac{1}{2} \cdot u_B \cdot (H - h_2) \quad (\text{Ver Fig. 3.7.11})$$

y por lo tanto el empuje del agua en el tramo BF sería:

$$E_w = \frac{1}{\cos \alpha} \cdot E_{hw}$$

En esta integración se ha supuesto una variación lineal de presiones a lo largo de la línea BC aunque en ciertas ocasiones con gradientes de filtración importantes puede ser conveniente calcular mejor esta integral.

Se supone, además, que el empuje del agua está situado a una altura “ h_3 ” respecto a la base del muro igual a la tercera parte de la diferencia de cotas entre B y C, esto es:

$$h_3 = \frac{1}{3} \cdot (H - h_2) \quad (\text{Ver Fig. 3.7.11})$$

La presión vertical efectiva de referencia en un punto del muro situado a una profundidad « h » bajo la coronación se calcula mediante la expresión:

$$\sigma'_v = \gamma_{ap} \cdot h_1 + (\gamma' + l_v \cdot \gamma_w) \cdot (h - h_1)$$

donde:

- γ_{ap} = peso específico aparente.
- γ' = peso específico sumergido.
- l_v = gradiente hidráulico descendente.

este gradiente se define como el cociente entre la pérdida del nivel piezométrico del agua del trasdós entre F y B y la altura que separa a esos dos puntos, esto es:

$$l_v = 1 - \frac{u_B}{\gamma_w(H - h_1)}$$

Cuando el empuje del agua se calcula como se indica y cuando la presión vertical efectiva de referencia tiene el significado definido antes, se entiende en esta ROM que el coeficiente de empuje activo es el cociente que se indica en la parte superior de la Fig. 3.7.11.

3.7.5.2 Valor del coeficiente de empuje activo

El coeficiente de empuje activo puede estimarse mediante la teoría de Coulomb, cuya solución se indica en la Fig. 3.7.12 para el caso de un terreno granular, seco y homogéneo.

El ángulo “ δ ” es un parámetro de entrada, de manera que el ingeniero tiene que decidir su valor para calcular el coeficiente de empuje correspondiente. En el apartado 3.7.3 se dan criterios para evaluar el valor de este ángulo.

Para facilitar el cálculo de empujes según el método de Coulomb se incluye la Tabla 3.7.2 que indica el valor de K_{ah} :

$$K_{ah} = K_a \cdot \cos(\sigma + \delta)$$

para distintos valores de los ángulos ϕ , α y β .

El coeficiente de empuje activo de Coulomb es aplicable siempre para el cálculo de empujes activos.

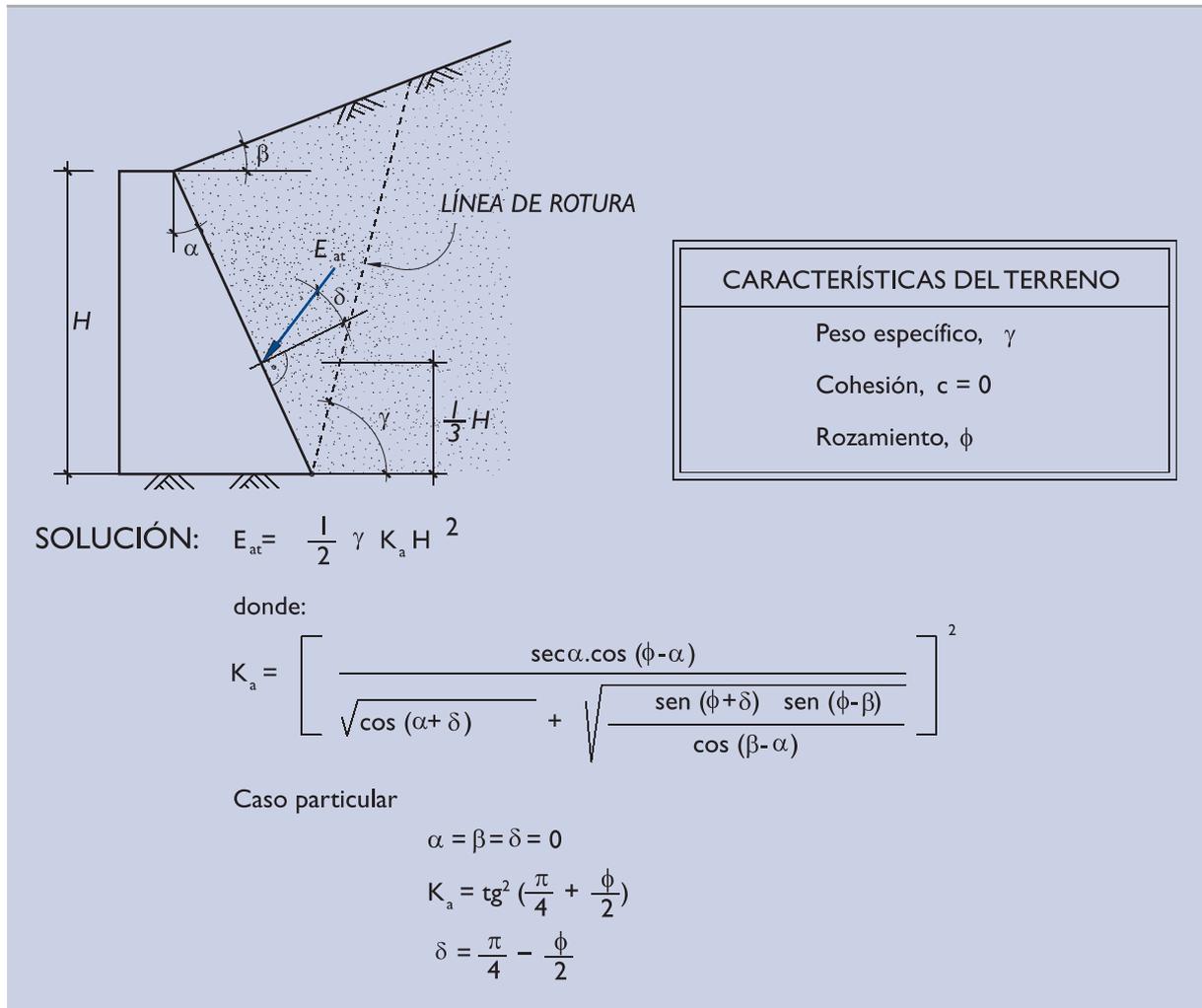
La inclinación de la línea de rotura del trasdós que resulta de la teoría de Coulomb para el caso de un terreno granular seco y homogéneo viene dada por la expresión:

$$\text{tg}(\zeta - \beta) = \frac{\cos \rho \sqrt{\cos(\alpha - \beta) \text{sen}(\phi - \beta)}}{\sqrt{\cos(\alpha + \delta) \text{sen}(\phi + \delta) - \text{sen} \rho \sqrt{\cos(\alpha - \beta) \text{sen}(\phi - \beta)}}$$

siendo “ ρ ” el ángulo auxiliar.

$$\rho = \phi + \alpha + \delta - \beta$$

Figura 3.7.12. Geometría y solución del problema resuelto analíticamente por Coulomb



Para el caso particular de muros verticales con trasdós horizontal ($\alpha = \beta = 0$) la expresión anterior se simplifica:

$$\operatorname{tg} \zeta = \operatorname{tg} \phi + \frac{1}{\cos \phi} \sqrt{\frac{\sin \phi \cos \delta}{\sin(\phi + \delta)}}$$

Si, además, la dirección del empuje coincidiese con la normal al trasdós ($\delta = 0$), resultaría:

$$\zeta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

Tabla 3.7.2. Valores de K_{ah} según Blum

ϕ	α	β	δ	20°					30°					40°				
				-20°	-10°	0°	+10°	+20°	-20°	-10°	0°	+10°	+20°	-20°	-10°	0°	+10°	+20°
+20°			+20°	1,132	1,132	1,132	1,132	1,132	0,798	0,708	0,646	0,595	0,547	0,555	0,488	0,454	0,416	0,380
			+10°	1,132	0,818	0,721	0,651	0,590	0,708	0,605	0,537	0,483	0,435	0,498	0,440	0,396	0,359	0,324
			0°	1,132	0,721	0,609	0,532	0,470	0,646	0,537	0,468	0,414	0,367	0,454	0,396	0,353	0,316	0,283
			-10°	1,132	0,651	0,532	0,455	0,394	0,595	0,483	0,414	0,362	0,317	0,416	0,359	0,316	0,281	0,250
			-20°	1,132	0,590	0,470	0,394	0,335	0,547	0,435	0,367	0,317	0,275	0,380	0,324	0,283	0,250	0,220
+10°			+20°	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	0,661	0,558	0,539	0,502	0,468	0,426	0,385	0,355	0,329	0,306
			+10°	1,000	0,726	0,644	0,588	0,541	0,588	0,505	0,454	0,413	0,378	0,385	0,344	0,313	0,288	0,265
			0°	1,000	0,644	0,551	0,489	0,440	0,539	0,454	0,402	0,361	0,326	0,355	0,313	0,283	0,259	0,237
			-10°	1,000	0,588	0,489	0,426	0,377	0,502	0,413	0,361	0,321	0,288	0,329	0,288	0,259	0,235	0,213
			-20°	1,000	0,541	0,440	0,377	0,300	0,468	0,378	0,326	0,288	0,256	0,306	0,265	0,237	0,213	0,193
0°			+20°	0,883	0,883	0,883	0,883	0,883	0,532	0,477	0,441	0,413	0,389	0,315	0,287	0,267	0,250	0,235
			+10°	0,883	0,638	0,569	0,523	0,486	0,477	0,413	0,374	0,344	0,321	0,287	0,258	0,238	0,221	0,207
			0°	0,883	0,569	0,490	0,440	0,401	0,441	0,374	0,333	0,304	0,279	0,267	0,238	0,217	0,201	0,187
			-10°	0,883	0,523	0,440	0,388	0,350	0,413	0,344	0,304	0,275	0,251	0,250	0,221	0,201	0,186	0,172
			-20°	0,883	0,486	0,401	0,350	0,311	0,389	0,321	0,279	0,251	0,227	0,235	0,207	0,187	0,172	0,159
-10°			+20°	0,773	0,773	0,773	0,773	0,773	0,421	0,375	0,348	0,327	0,311	0,219	0,200	0,187	0,177	0,169
			+10°	0,773	0,551	0,492	0,455	0,426	0,375	0,325	0,296	0,275	0,258	0,200	0,181	0,169	0,159	0,150
			0°	0,773	0,492	0,426	0,385	0,355	0,348	0,296	0,266	0,245	0,228	0,187	0,169	0,156	0,146	0,138
			-10°	0,773	0,455	0,385	0,344	0,313	0,327	0,275	0,245	0,224	0,208	0,177	0,159	0,146	0,137	0,128
			-20°	0,773	0,426	0,355	0,313	0,283	0,311	0,258	0,228	0,208	0,191	0,169	0,150	0,138	0,128	0,121
-20°			+20°	0,665	0,665	0,665	0,665	0,665	0,312	0,277	0,258	0,244	0,233	0,135	0,124	0,117	0,112	0,108
			+10°	0,665	0,456	0,412	0,382	0,360	0,277	0,240	0,220	0,206	0,195	0,124	0,114	0,107	0,101	0,097
			0°	0,665	0,412	0,357	0,325	0,302	0,258	0,220	0,199	0,185	0,174	0,117	0,107	0,100	0,095	0,090
			-10°	0,665	0,382	0,325	0,292	0,269	0,244	0,206	0,185	0,171	0,160	0,112	0,101	0,096	0,090	0,085
			-20°	0,665	0,360	0,302	0,269	0,246	0,233	0,195	0,174	0,160	0,150	0,108	0,097	0,090	0,085	0,081

En aquellos casos en que el trasdós de cálculo del muro se ha obtenido mediante alguna simplificación de manera que la línea virtual que lo representa se aleja bastante del trasdós real del muro, puede ser más conveniente evaluar el coeficiente de empuje según el método de Rankine que se indica en la Fig. 3.7.13.

El método de Rankine supone una plastificación completa por extensión del terreno en el trasdós del muro y eso implica una determinada inclinación del empuje. Este método se considera aplicable siempre que la dirección del empuje que resulta de su aplicación sea compatible con el movimiento relativo tierras-muro que pueda producirse en la situación de proyecto que se trata de analizar.

La inclinación de la línea de rotura del trasdós en un medio granular seco y homogéneo que se deduce de la teoría de Rankine resulta:

$$\zeta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} - \frac{1}{2} \left[\arcsen \left(\frac{\sen \beta}{\sen \phi} \right) - \beta \right]$$

que, como se ve, no depende de la inclinación del trasdós del muro.

Para el caso particular de terreno horizontal el método de Rankine indica:

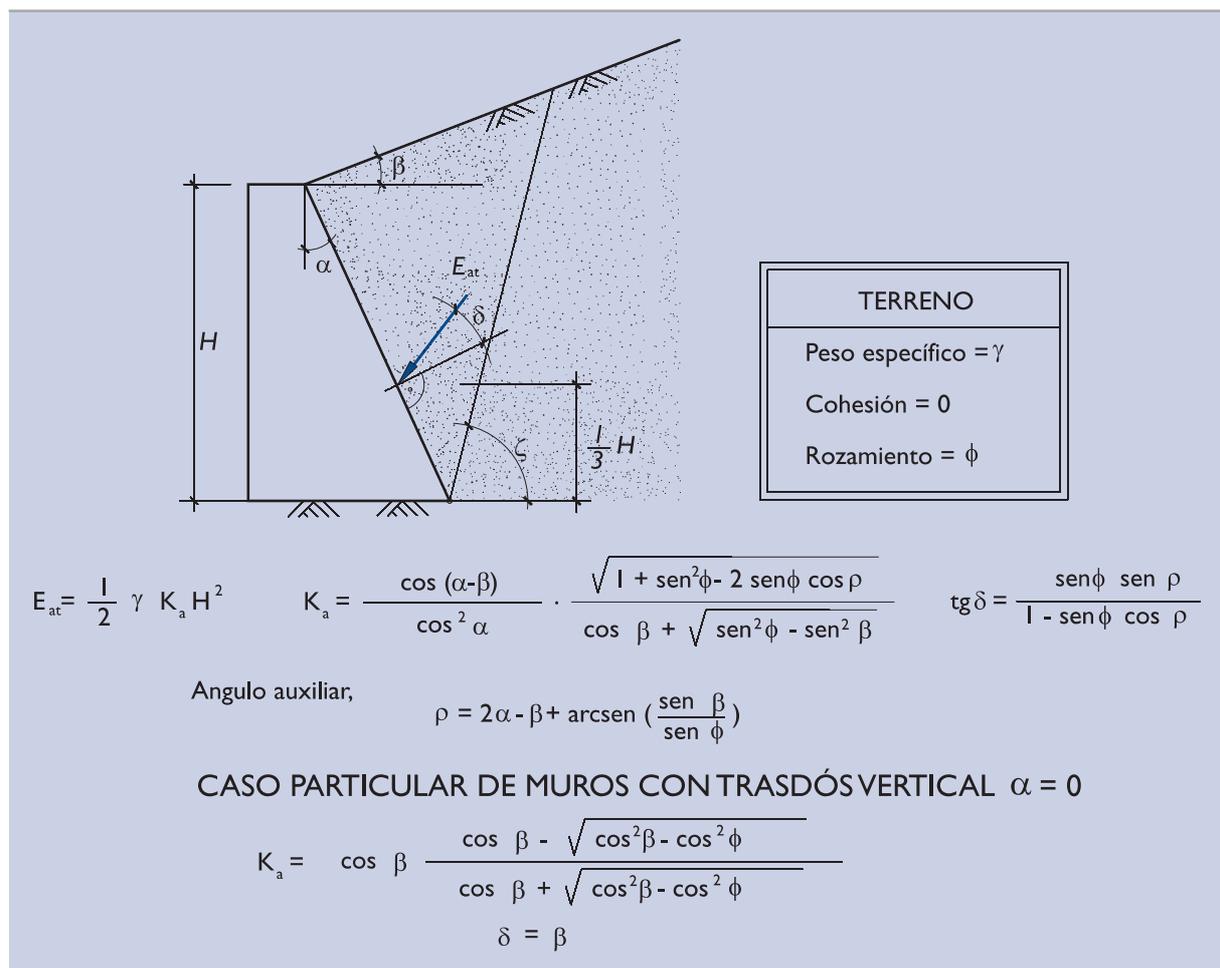
$$\zeta = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$$

Con estas teorías sencillas se puede estimar no sólo el coeficiente de empuje activo sino también la situación aproximada de la línea de rotura. En las aplicaciones prácticas ha de tenerse en cuenta que la inclinación de esta línea es muy sensible a otros efectos secundarios. La existencia de sobrecargas de gran extensión no afectaría a la ubicación de la línea de rotura pero la presencia de sobrecargas de extensión limitada, las cargas concentradas, la situación del nivel freático, la existencia de cohesión, etc., modifican su inclinación.

Existen otros procedimientos de cálculo más complejos que conducen a valores del coeficiente de empuje activo ligeramente distintos. Entre ellos cabe destacar el método basado en la teoría de la plasticidad. Uno de estos métodos se describen en el apartado 3.7.6 para el cálculo del empuje pasivo y allí se indica cómo se podría usar para el cálculo del empuje activo.

Las diferencias de este último método respecto al método de Coulomb, para el cálculo del coeficiente de empuje activo, son en general pequeñas y la experiencia no ha indicado cuál de los dos se aproxima más al comportamiento real. Por ese motivo la aplicación del método basado en la teoría de la plasticidad sin peso se considera útil únicamente en el cálculo de algunos casos singulares.

Figura 3.7.13. Geometría y solución del problema resuelto por Rankine



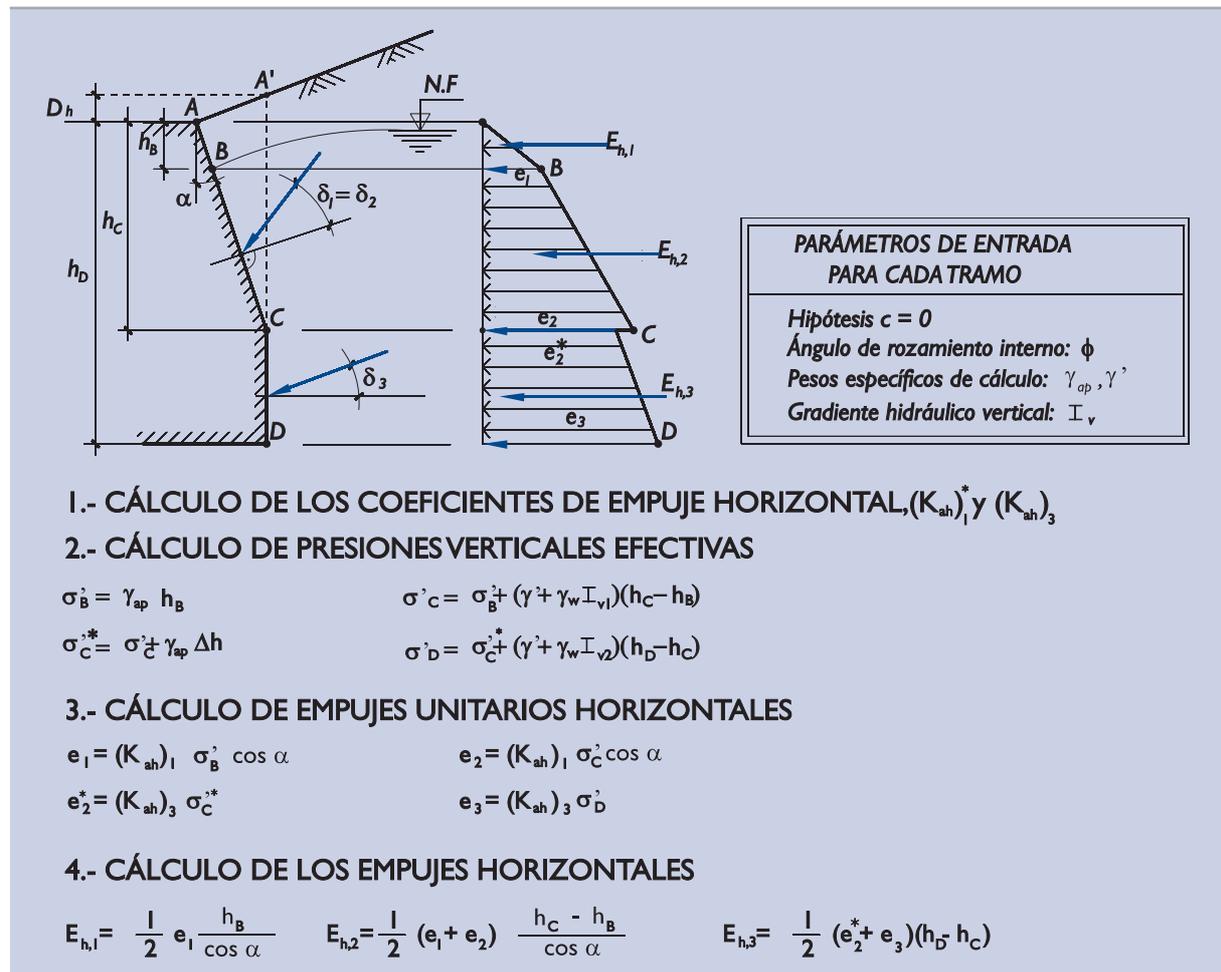
3.7.5.3 Cálculo del empuje efectivo debido al peso del terreno

Cuando el trasdós es plano y el terreno que empuja es homogéneo, la aplicación de la extensión del concepto de empuje activo conduce directamente a la determinación de los empujes. Así queda ilustrado en el apartado 3.7.5.1.

El caso más general de trasdós quebrado y distintos terrenos puede resolverse generalizando algo más la aplicación del concepto del coeficiente de empuje.

En un determinado muro cuyo trasdós sea el ABCD indicado en la Fig. 3.7.14, se puede calcular el empuje horizontal debido al peso efectivo de las tierras mediante el proceso que se indica en esa misma figura.

Figura 3.7.14. Cálculo de empujes activos horizontales debidos al peso efectivo del terreno



Nota: En este ejemplo K_{ah} se supone constante en el tramo AC por ser uniformes el terreno y la inclinación del muro en este tramo.

Los datos de entrada del problema serán las resistencias de los distintos terrenos, las inclinaciones de los distintos tramos del muro, los pesos específicos de cálculo y el gradiente hidráulico vertical. Este último se habrá determinado como se indica en el apartado siguiente.

En el primer paso del cálculo se determinan los valores del coeficiente de empuje horizontal que corresponden a las distintos tramos del muro en función del ángulo de rozamiento interno del terreno de cada tramo y de los ángulos α y δ correspondientes.

En el segundo paso del cálculo se determinan los valores de las presiones verticales efectivas de referencia. Para ese cálculo se utilizarán las densidades aparentes por encima del nivel freático (entre A y B) y las densidades sumergidas por debajo de ese nivel. Los pesos específicos sumergidos deben aumentarse en la cantidad $\gamma_w l_v$ a efectos de tener en cuenta el posible gradiente vertical del movimiento del agua, tal como se indica en el apartado que sigue.

Para medir las profundidades de cálculo se tomará como nivel de referencia el punto donde la prolongación del trasdós del muro corte a la superficie del terreno, esto es, el punto A para el tramo AC y el punto A' para el tramo CD, en la figura que se comenta.

En el tercer paso se obtienen las componentes horizontales de los empujes unitarios en cada punto del muro. En los puntos de quiebro del muro o en los puntos donde cambia la resistencia del terreno se obtendrán dos valores del empuje. Uno de ellos corresponderá al cálculo como punto bajo del tramo superior y el otro como punto alto del tramo siguiente. Ambos valores pueden ser diferentes.

El cuarto paso consiste en integrar las leyes de empujes unitarios horizontales en cada tramo para obtener los empujes horizontales correspondientes y sus líneas de acción.

En caso de que interese conocer también la componente vertical del empuje en cada tramo basta con multiplicar el valor del empuje horizontal por la tangente del ángulo de inclinación correspondiente al tramo, esto es:

$$E_{v,i} = E_{h,i} \operatorname{tg}(\alpha + \delta)_i$$

Ese empuje vertical estará dirigido hacia abajo si tiene signo positivo y cortará al trasdós del muro en el mismo punto que el empuje horizontal asociado.

El cálculo del empuje del agua, la consideración del efecto de la posible cohesión del relleno y la estimación del efecto de las sobrecargas permitirán el cálculo completo de empujes sobre el muro. En los apartados que siguen se dan algunas recomendaciones que pueden ayudar al ingeniero en esos cálculos.

3.7.5.4 El empuje del agua

El método simplificado basado en los coeficientes de empuje requiere el cálculo separado del efecto del agua. El método que se siga para la determinación del empuje debido al peso efectivo de las tierras debe estar en consonancia con el método de estimación del empuje complementario del agua. El procedimiento que se describe a continuación debe aplicarse cuando, simultáneamente, se ha utilizado el descrito en el apartado precedente para evaluar la parte del empuje debida al peso efectivo de las tierras.

El estado del agua en el trasdós debe definirse por la ley de presiones intersticiales a lo largo de una línea que pasa por el talón del muro y forma un ángulo de $45^\circ + \phi/2$ con la horizontal. A estos efectos se utilizará como ángulo de rozamiento el correspondiente al material más débil del trasdós.

Esta ley de presiones debe obtenerse mediante el cálculo previo de la red de filtración correspondiente, a cuyos efectos deben seguirse las recomendaciones que se indican en el apartado 3.4.

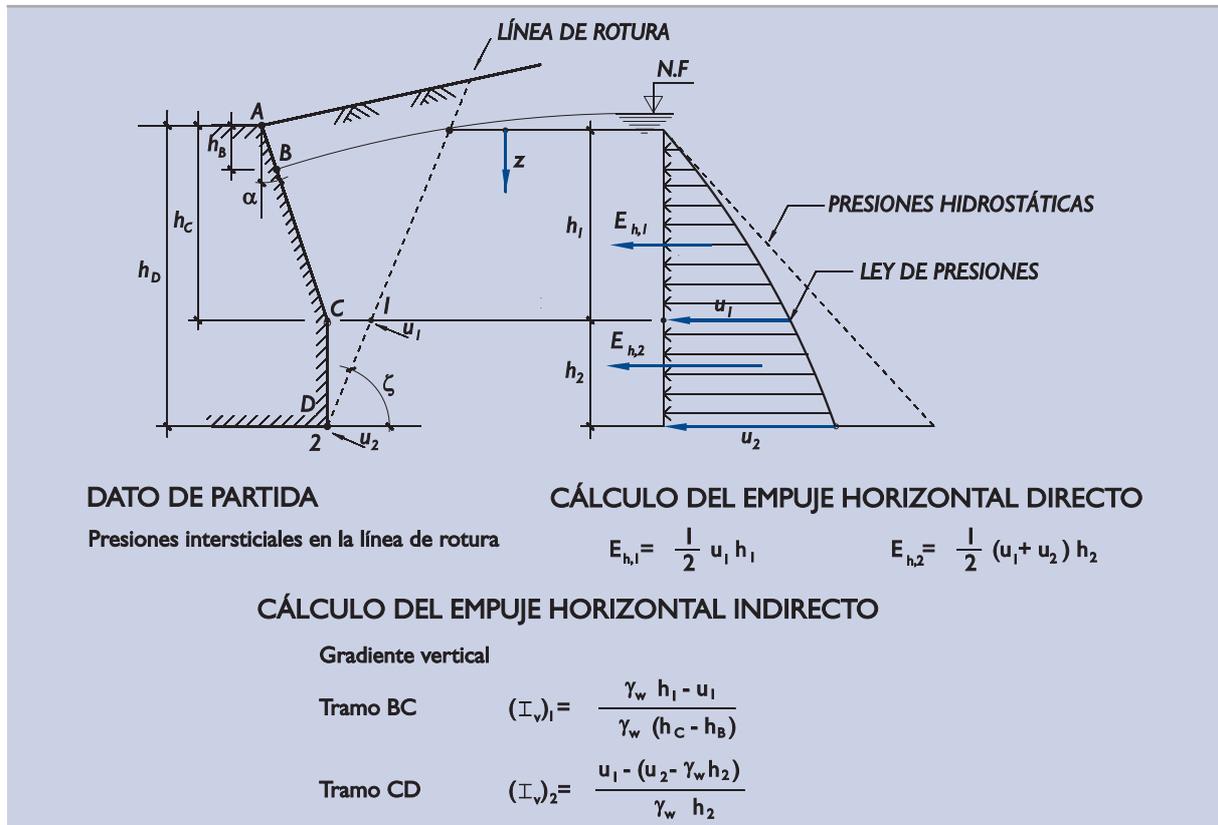
El cálculo del empuje horizontal del agua intersticial sobre el muro debe realizarse siguiendo el procedimiento indicado en la Fig. 3.7.15.

En esa figura se trata de indicar que el empuje horizontal debido al agua en cada tramo de cálculo se obtiene mediante integración directa de la ley de presiones en los tramos h_1 y h_2 . Esa integración se hace, en la mencionada figura, suponiendo leyes de variación lineal de la presión en cada tramo.

La componente vertical del empuje del agua se deduce multiplicando estos empujes horizontales por la tangente del ángulo del trasdós del muro con la vertical en el tramo correspondiente, esto es:

$$E_{v,i} = (\operatorname{tg}\alpha)_i E_{h,i}$$

Figura 3.7.15. Cálculo del empuje horizontal del agua



Nota: A efectos de este cálculo la línea de rotura puede suponerse plana y definida por el ángulo $\zeta = 45^\circ + \phi/2$ donde ϕ es el ángulo de rozamiento del terreno más débil del trasdós.

Este cálculo conduce no sólo al valor del empuje horizontal del agua sino también a la definición de su línea de acción.

Según se ha indicado, el empuje del agua (suma de sus componentes horizontal y vertical) resultará normal al paramento de trasdós. Su línea de acción lo corta en el mismo punto que lo hace la componente horizontal correspondiente.

Por otro lado, es preciso contabilizar el efecto indirecto que produce el gradiente vertical debido al movimiento del agua. Para ello se calcularán esos gradientes por tramos tal como se indica en la mencionada figura. Estos gradientes son necesarios para el cálculo de los empujes activos debidos al peso efectivo del terreno descrito en el apartado anterior.

3.7.5.5 El efecto de la cohesión

Los rellenos de trasdós de las estructuras de contención de empuje de tierras serán normalmente granulares y, por lo tanto, sólo algunos cálculos de empuje activo requerirán la consideración del efecto de la cohesión.

En aquellos casos en los que en el trasdós de la obra de contención existan suelos cohesivos se tendrá en cuenta el efecto de la cohesión con ciertas limitaciones.

El efecto de la cohesión es siempre beneficioso en el sentido de reducir el empuje activo. La cohesión, sin embargo, es una parte de la resistencia del terreno que se puede perder a largo plazo, ya sea por aflojamiento de

la estructura del terreno (entumecimiento causado por la humectación o la saturación) o por la fisuración que puede producirse debido a los movimientos del muro o a los cambios climáticos (fisuración por desecación).

Una vez investigado el valor de la cohesión que razonablemente puede existir en el material que trasdosa el muro en el momento correspondiente a la situación de proyecto que se trata de analizar, su efecto en el empuje activo se puede estimar como se indica a continuación.

El efecto de la cohesión en la resistencia de un material que además tiene fricción ($\phi \neq 0$) es equivalente a la mejora que supondría comprimir todo el terreno con una tensión isotrópica de intensidad:

$$q = \frac{c}{\text{tg}\phi}$$

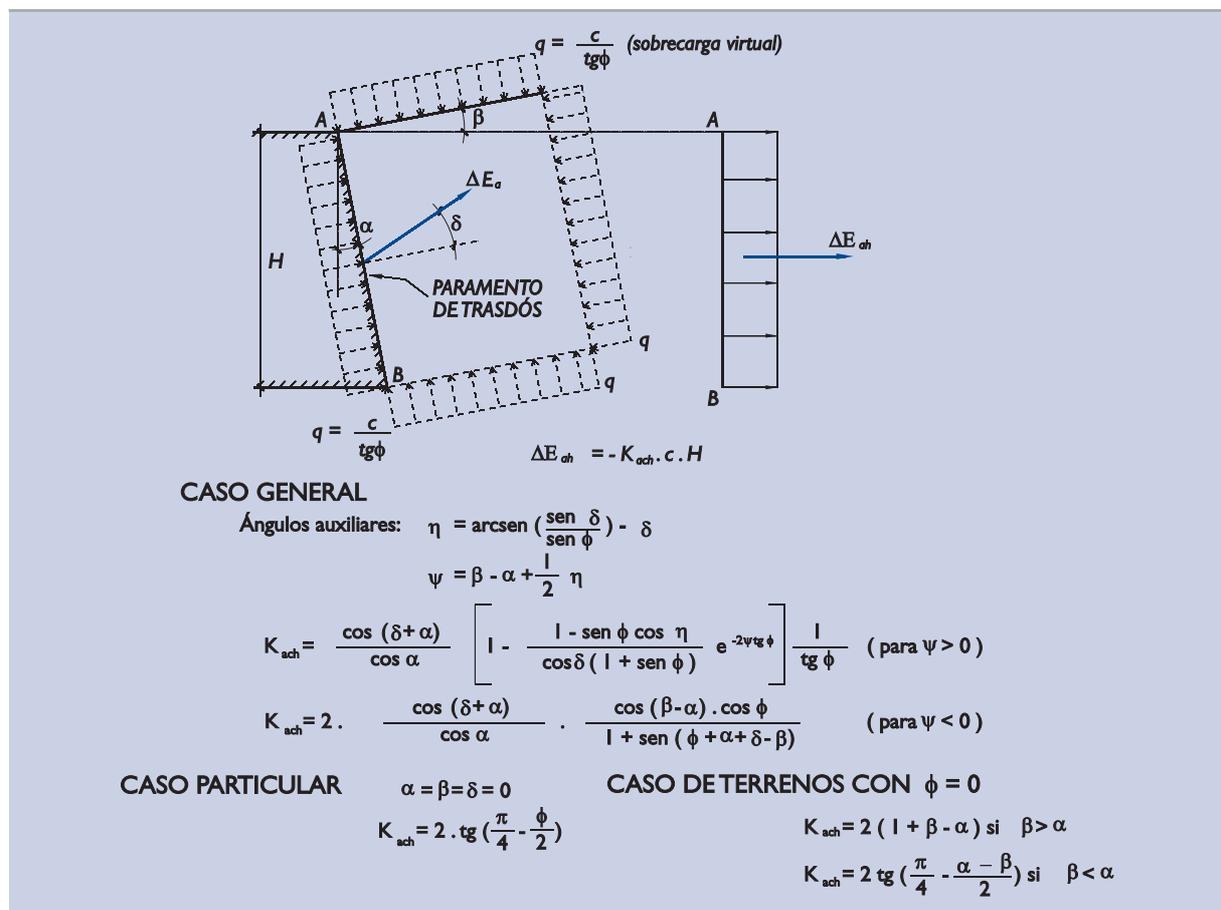
De hecho, una succión capilar de esa intensidad “q” da a las arenas húmedas no saturadas una cohesión aparente controlada por la expresión anterior.

Basándose en ese principio básico y utilizando como modelo de cálculo la teoría de la plasticidad simplificada, que se describe con más detalle en el punto 3.7.7.2, se puede deducir el valor del coeficiente de empuje activo debido a la cohesión, K_{ach} . Su componente horizontal es:

$$K_{ach} = K_{ac} \cdot \cos(\alpha + \delta)$$

El valor de K_{ach} se puede estimar con las fórmulas indicadas en la Fig. 3.7.16.

Figura 3.7.16. Efecto de la cohesión en el empuje activo horizontal



Nota: En estas fórmulas se supone que los arcos se expresan en radianes.

El ángulo “ δ ” correspondiente a la disminución de empuje debido a la cohesión debe ser el mismo que el definido en el apartado 3.7.3.3 y que se utiliza para el cálculo del empuje debido al peso efectivo de las tierras.

En estas expresiones se utiliza el ángulo auxiliar Ψ , cuyo significado físico puede verse en la explicación teórica que se indica en el punto 3.7.7.2. Ese ángulo debe ser positivo, ya que la geometría de la rotura que se supone para deducir las fórmulas deja de ser válida para valores negativos de ese ángulo.

En aquellos casos en los que Ψ sea negativo se puede obtener una aproximación suficientemente ajustada de K_{ach} entrando en la expresión alternativa indicada en la misma Fig. 3.7.16, deducida del cálculo de empujes en la hipótesis de línea de rotura plana.

En aquellos casos en los que la resistencia del terreno del trasdós sea exclusivamente debida a la cohesión, esto es, cuando el ángulo de rozamiento de cálculo sea $\phi = 0$, resultará que alguna de las fórmulas mencionadas conducen a una situación indefinida. El estudio de sus valores límite permite, sin embargo, deducir las fórmulas a aplicar en este caso particular. Esas expresiones analíticas se indican en la parte inferior de la mencionada Fig. 3.7.16.

Al considerar el efecto de la cohesión en el cálculo de los empujes unitarios pueden resultar, tras componerlos con los debidos a otros efectos, valores negativos en la zona próxima a la coronación del muro. Aunque tales valores sean teóricamente correctos deben sustituirse por valores nulos; no se considera recomendable admitir esas tracciones.

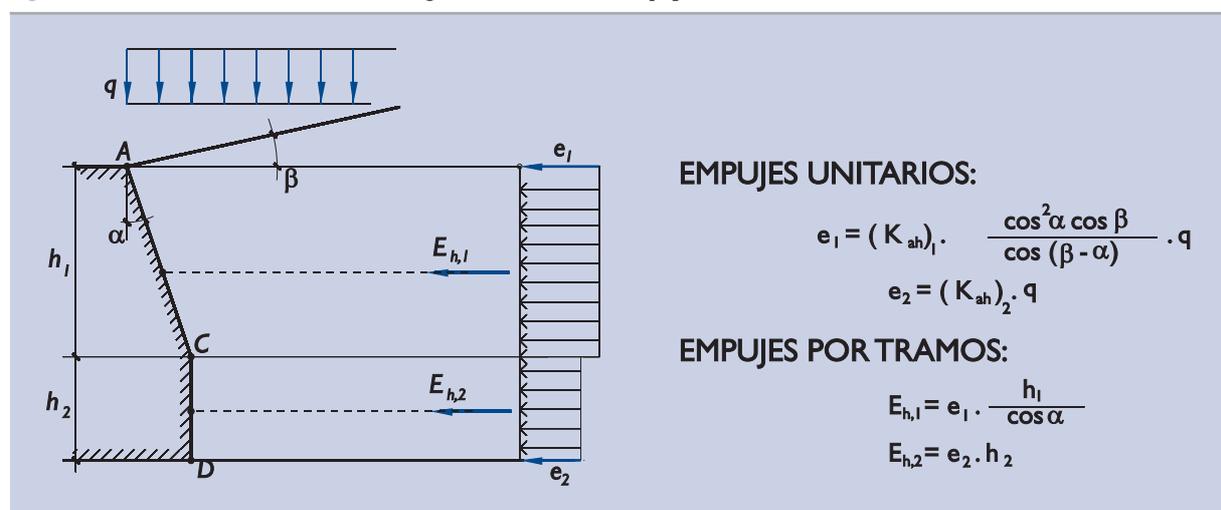
3.7.5.6 El efecto de las sobrecargas

Las sobrecargas que actúan sobre la superficie del terreno en el trasdós del muro aumentan el valor del empuje activo. A continuación se dan recomendaciones sobre el procedimiento de evaluación de los empujes adicionales causados por las sobrecargas.

3.7.5.6.1 SOBRECARGAS VERTICALES UNIFORMES DE GRAN EXTENSIÓN

La sobrecarga más simple a efectos de cálculo, y además bastante frecuente en obras portuarias, es la sobrecarga uniforme y de gran extensión. La intensidad de esta sobrecarga se define como la carga total (en kN) que actúa por cada metro cuadrado de proyección en planta. El efecto de esta sobrecarga en el empuje activo puede considerarse equivalente al que produce un empuje unitario adicional sobre el trasdós del muro como el indicado en la Fig. 3.7.17.

Figura 3.7.17. Efecto de una sobrecarga uniforme en el empuje activo horizontal



Nota: Para definición de K_{ah} ver texto.

La sobrecarga q es vertical y se define actuando sobre el área de la proyección en planta.

Las componentes verticales de los empujes debidos a este tipo de sobrecargas podrán obtenerse multiplicando los valores de los empujes horizontales por las tangentes de los ángulos de inclinación correspondientes en cada tramo. Esto es,

$$E_{v_i} = E_{h_i} \cdot \operatorname{tg} (\alpha + \delta)_i$$

3.7.5.6.2 SOBRECARGAS VERTICALES UNIFORMES DE EXTENSIÓN LIMITADA

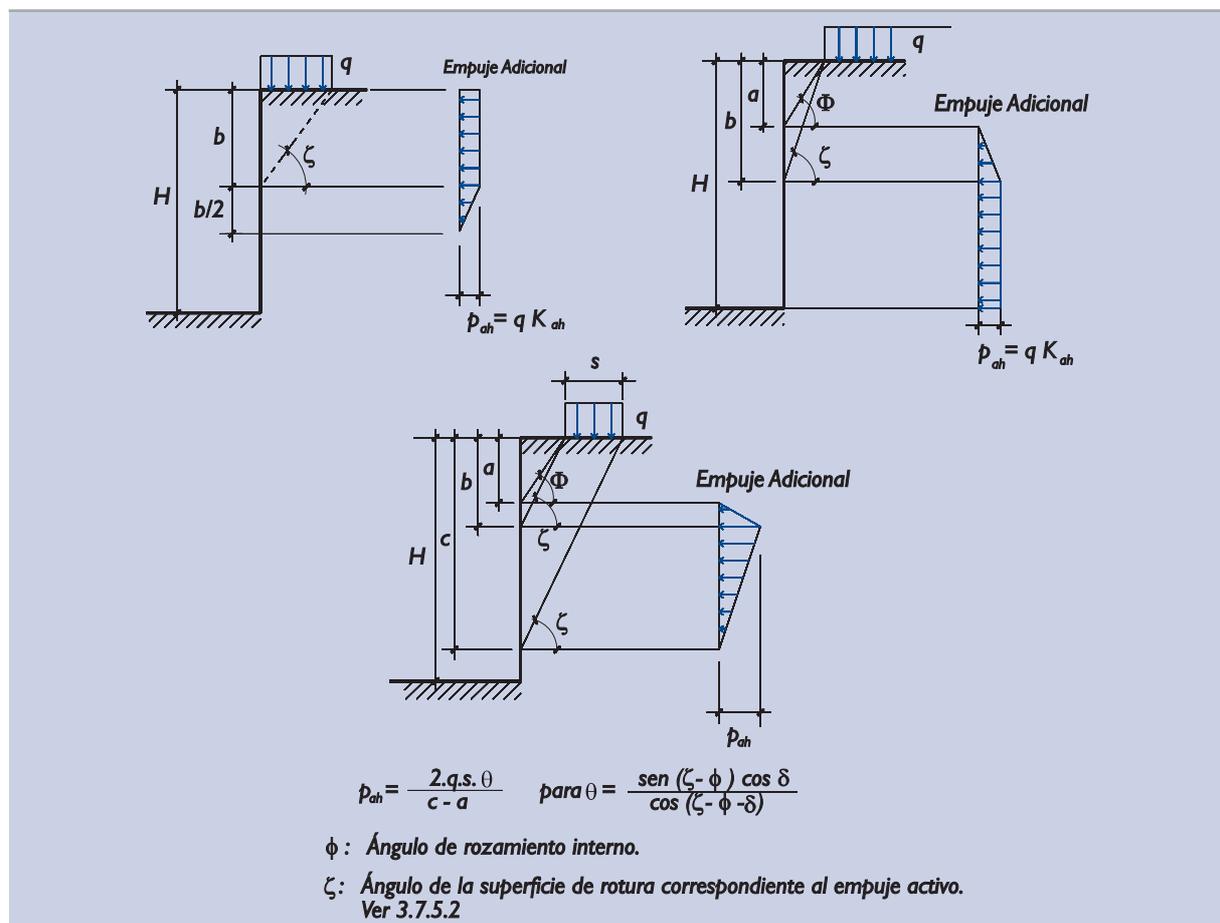
Las sobrecargas verticales uniformes mencionadas en el punto anterior pueden tener una dimensión limitada, ya sea en la dirección perpendicular a la coronación del muro o en la propia dirección del muro.

Cuando estas cargas se extienden indefinidamente en la dirección del muro pero están limitadas en la dirección normal, el problema de cálculo del empuje sigue siendo bidimensional y puede resolverse haciendo las hipótesis simplificativas que se ilustran gráficamente en la Fig. 3.7.18.

En esa figura se indica exclusivamente el valor de la componente horizontal del empuje. El conocimiento previo del ángulo “ δ ” correspondiente permitirá el cálculo de la componente vertical asociada.

Quiere advertirse que, tratándose de un problema de equilibrio límite y teniendo presente las simplificaciones implícitas en la Fig. 3.7.18, los efectos de las sobrecargas no son estrictamente superponibles. Esto es, el empuje causado por la suma de dos sobrecargas es distinto, en general menor, que la suma de sus efectos parciales cuando se consideran aisladas.

Figura 3.7.18. Efecto de sobrecargas parciales en el empuje activo horizontal



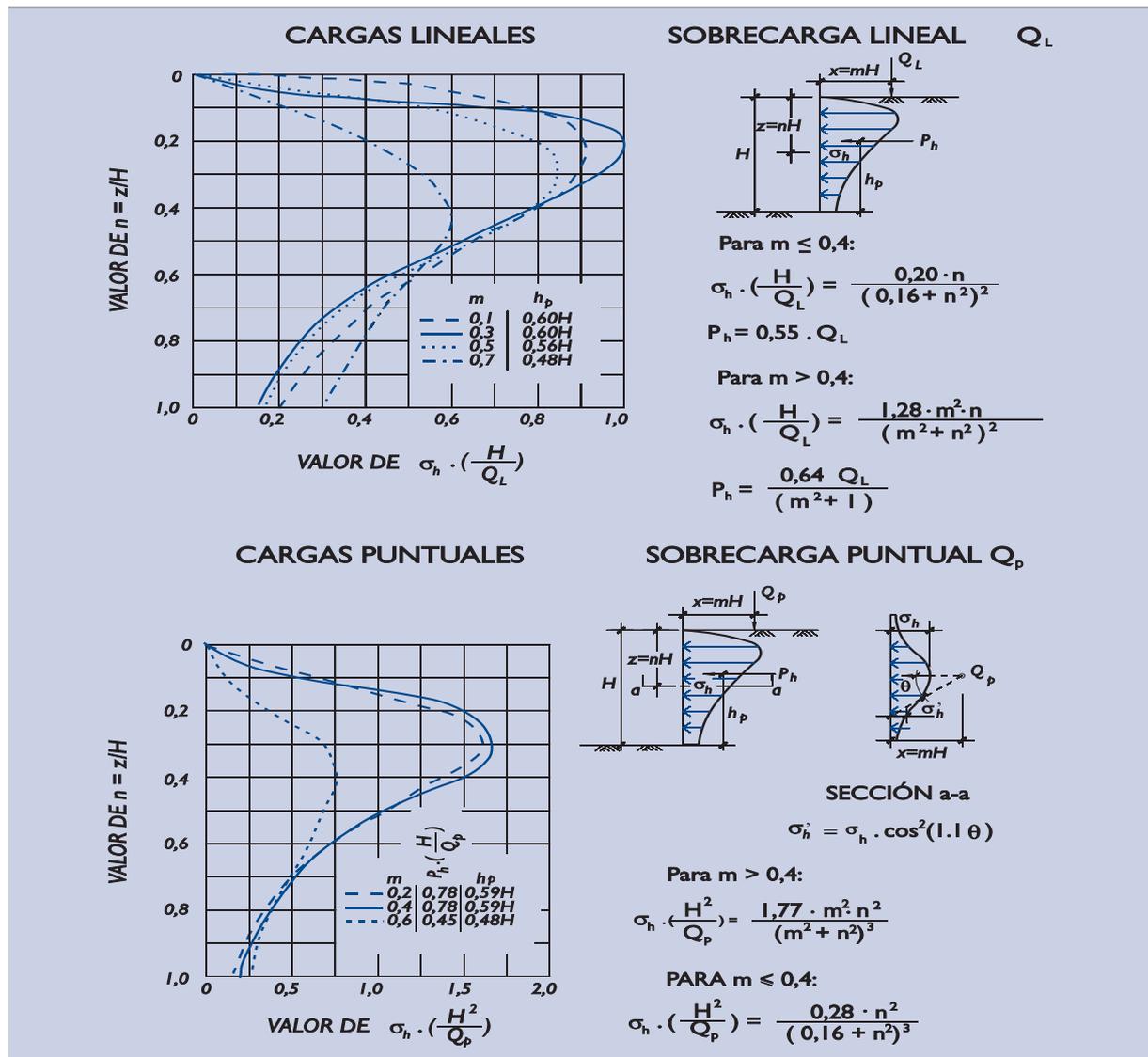
Por ese motivo es recomendable utilizar los gráficos de la figura únicamente para sumar efectos de distintas sobrecargas, ya que ello conducirá en general a resultados conservadores. No se debe, sin embargo, utilizar esas soluciones para restar el efecto de sobrecargas.

Esta última situación podría darse, por ejemplo, en aquellos casos en los que una determinada zona tuviese una sobrecarga menor y el ingeniero decidiese abordar el cálculo en dos fases: primero suponiendo la intensidad homogénea y constante en toda la zona; y después detrayendo, como sobrecarga negativa, el defecto local de sobrecarga. Ese procedimiento no es recomendable ya que conduce a resultados optimistas, esto es, del lado de la inseguridad.

3.7.5.6.3 SOBRECARGAS VERTICALES LINEALES O CONCENTRADAS

Las sobrecargas que actúan en líneas paralelas a la coronación del muro aumentan el empuje activo sobre el muro. El empuje unitario horizontal adicional que provocan, así como su resultante, puede estimarse con el procedimiento indicado en la Fig. 3.7.19.

Figura 3.7.19. Efecto de cargas lineales o concentradas en el empuje activo horizontal



En la parte inferior de esa misma figura se indica el incremento de empujes horizontales causado por una sobrecarga vertical concentrada.

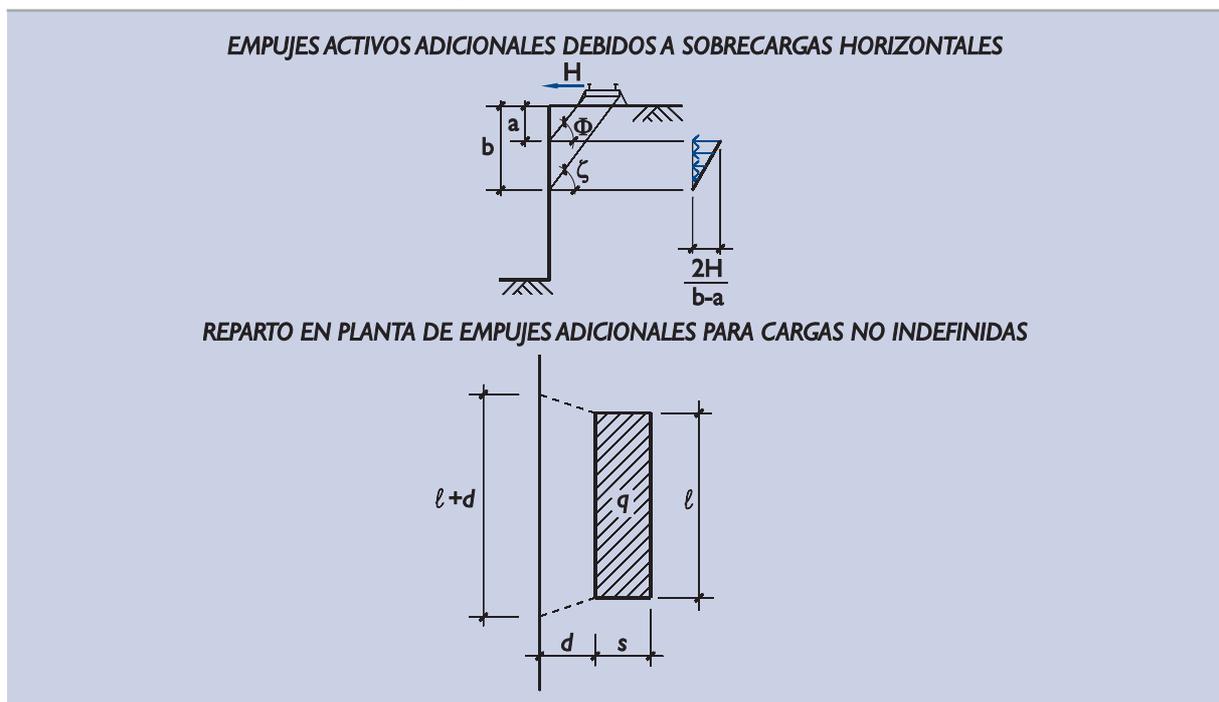
En ambos casos la solución está obtenida de ciertas consideraciones basadas en la teoría de la elasticidad. Las soluciones indicadas no dependen de la resistencia del material del trasdós ni de la posible ubicación de la línea de rotura. En consecuencia, la superposición de efectos es plenamente concordante y el ingeniero puede componer, con adiciones y sustracciones de estos casos elementales, el efecto de las sobrecargas reales que existan.

3.7.5.6.4 OTRAS SOBRECARGAS

Las sobrecargas horizontales, ya sean concentradas o distribuidas linealmente, son frecuentes en las proximidades de los muelles de gravedad. Su consideración en el cálculo del empuje activo es fundamental, ya que su acción se transmite íntegramente al muro cuando están situadas dentro de la cuña de rotura.

En la Fig. 3.7.20 se indica un procedimiento simplificado sobre la forma en que puede considerarse su efecto.

Figura 3.7.20. Efectos de otras sobrecargas



Nota: ϕ y ζ definidos en Fig. 3.7.18.

Las sobrecargas que tienen una extensión limitada en la dirección longitudinal del muro pueden considerarse a efectos de cálculo como si tuvieran longitud indefinida, ya que esta simplificación conduce a resultados del lado de la seguridad. En aquellos casos en los que la longitud de la zona sobrecargada sea relativamente corta respecto a las dimensiones del muro (menor que la distancia entre dos juntas estructurales por ejemplo), se admite suponer que el reparto de la acción sobre el muro se produce sobre una longitud mayor que la propia longitud de la sobrecarga. Ese aumento de longitud debe ser en cualquier caso igual o inferior a la distancia más corta de la sobrecarga al paramento del muro. Así se indica de manera esquemática para una sobrecarga vertical uniforme limitada en ambas direcciones. Esta misma idea se considera aplicable a cualquier otro tipo de sobrecarga de extensión limitada longitudinalmente.

3.7.6 Método general de cálculo del empuje pasivo

El empuje pasivo entre el terreno y la estructura de contención se produce cuando el movimiento relativo entre ambos es en el sentido de aproximarse uno al otro.

La situación de empuje pasivo se produce en muros que han de soportar cargas externas importantes, tales como los empujes de atraque en muelles pilotados (muro de cierre en el lado tierra). Se produce también en las estructuras enterradas construidas para soportar el tiro de anclajes. En los muros pantalla se moviliza parcialmente el empuje pasivo en la zona de empotramiento del pie de la pantalla.

El cálculo del empuje pasivo es, en muchos aspectos, similar al cálculo del empuje activo. De hecho, bastaría con cambiar el signo del ángulo de rozamiento y de la cohesión del terreno para que las fórmulas asociadas al cálculo del empuje activo fuesen válidas en este otro caso.

El cálculo del empuje pasivo ofrece, sin embargo, ciertas singularidades que conviene destacar tal como se hace en los apartados que siguen.

3.7.6.1 Datos necesarios

Los datos necesarios para calcular el empuje pasivo entre una estructura y su terreno de trasdós son los mismos indicados en el apartado 3.7.4 para el cálculo del empuje activo. La diferencia esencial entre uno y otro cálculo estriba en que la sensibilidad del resultado a los datos de entrada pueden tener signo opuesto en uno y otro caso.

En el cálculo del empuje activo es conveniente hacer una estimación razonable y conservadora de la resistencia del terreno (cohesión y rozamiento). Esa misma idea se mantiene en el caso del empuje pasivo, pues cuanto mayor resistencia se suponga mayor resultará el empuje pasivo.

No ocurre lo mismo con el peso del terreno o con la intensidad de las sobrecargas. Cuanto mayores sean éstos, más optimista resultará la evaluación (mayores valores) del empuje pasivo. Por este motivo, la estimación de pesos debe hacerse de manera prudente y sólo deben contabilizarse aquellas cargas que realmente estén presentes en la situación de proyecto que se analiza.

Algo similar ocurre con la altura de muro. Si en el cálculo de empuje activo han de considerarse las secciones de mayor altura, en el del pasivo debe hacerse lo contrario.

En aquellas obras en cuyo análisis intervengan simultáneamente empujes activos y pasivos (muros pantalla por ejemplo) se deberán elegir para el análisis distintas secciones verticales a lo largo de la obra; la sección más alta puede no ser la más crítica.

La inclinación del empuje respecto a la normal al paramento, que se mide con el ángulo “ δ ”, estará condicionada por las coacciones externas que forzarán un cierto tipo de deslizamiento relativo muro-terreno.

En general ese ángulo será negativo y eso implica un aumento considerable del valor del empuje. El valor absoluto de “ δ ” debe limitarse tal como se indica en 3.7.3.3.

3.7.6.2 Línea de rotura

En el equilibrio límite, cuando el muro rompe el terreno, se produce una superficie de rotura (línea de rotura en los problemas planos) que forma con la horizontal un ángulo mucho menor que en el caso del empuje activo.

La longitud de la línea de rotura es, por lo tanto, mucho mayor que la correspondiente a la situación activa y, además, su pendiente es más variable a lo largo de su desarrollo.

Para calcular empujes pasivos deberán suponerse líneas de rotura de pendiente variable y creciente desde el pie del muro hasta su afloramiento en la superficie del terreno.

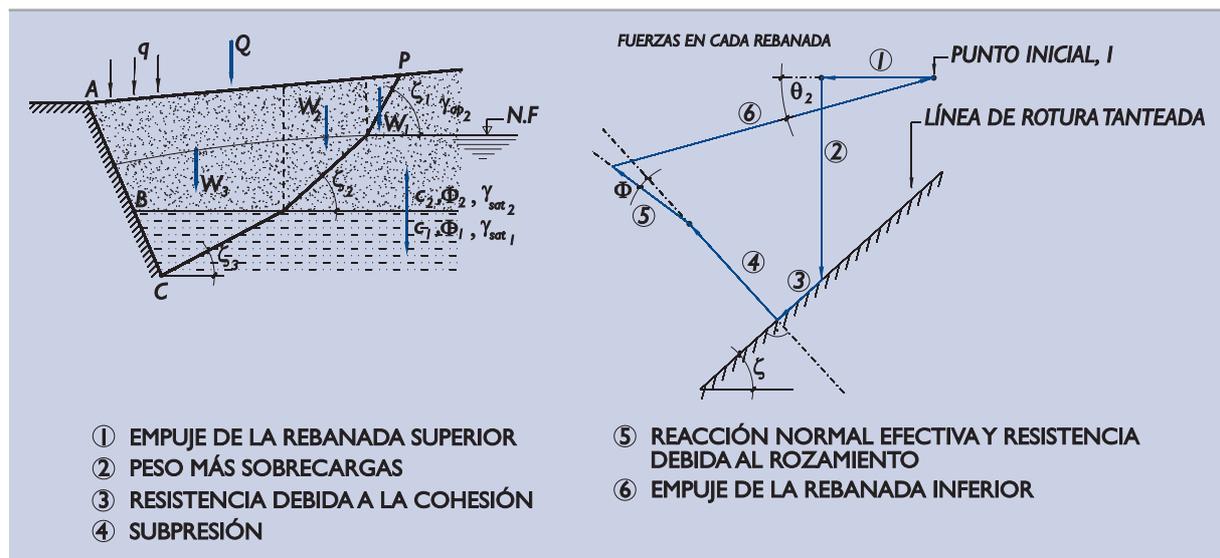
En el cálculo deben tantearse distintas líneas, que pueden ser poligonales. Los quiebros de estas líneas pueden hacerse en sus intersecciones con superficies de separación de distintos terrenos, en su corte con la superficie del agua y en puntos auxiliares intermedios que permitan una mejora de la precisión.

3.7.6.3 Cálculo del empuje

El empuje pasivo debe realizarse por un procedimiento similar al descrito en 3.7.4 para el cálculo del empuje activo, sin más que cambiar el sentido de las fuerzas debidas a la cohesión y al rozamiento.

En la Fig. 3.7.21 se indica esquemáticamente el diagrama de fuerzas de cálculo del equilibrio de una rebanada de la zona de rotura del empuje pasivo. El diagrama homólogo del empuje activo es el que se indica en la Fig. 3.7.9.

Figura 3.7.21. Esquema del método general de cálculo del empuje pasivo



El cálculo del empuje pasivo correspondiente a una determinada línea de rotura debe comenzarse por la cuña superior, suponiendo que el empuje entre esta cuña y la siguiente es horizontal.

Esa hipótesis de empuje horizontal entre rebanadas es conveniente excepto en la que limita con el muro, donde debe suponerse la inclinación correspondiente al ángulo “ δ ” previamente definido.

El cálculo del empuje pasivo puede hacerse con densidades saturadas, contabilizando entonces subpresiones en la línea de rotura o con densidades sumergidas, tal como se indica en 3.7.4.6, y añadiendo después el empuje del agua calculado de manera separada.

En el cálculo de empujes pasivos, el gradiente descendente del agua es favorable (da mayores empujes). Un gradiente ascendente puede ser extremadamente desfavorable, ya que puede reducir considerablemente el empuje pasivo. Esa situación, que puede darse en la zona de empotramiento de muros pantalla, requiere la máxima atención del ingeniero.

3.7.7 Métodos basados en el coeficiente de empuje pasivo

El cálculo del empuje pasivo por el método general antes indicado puede resultar tedioso, ya que han de comprobarse varias líneas de rotura que pasen por el pie del muro. Si además se quiere conocer el punto de aplicación del empuje, es necesario repetir ese proceso considerando pies de muro virtuales en distintos puntos del paramento del trasdós.

Por ese motivo se indica a continuación un procedimiento alternativo sencillo y en general suficientemente exacto, basado en el concepto del coeficiente de empuje pasivo.

3.7.7.1 El concepto del coeficiente de empuje pasivo

La definición del concepto de coeficiente de empuje pasivo se ilustra esquemáticamente en la Fig. 3.7.22.

Se entiende como coeficiente de empuje pasivo, en esta ROM, al cociente:

$$K_p = \frac{e}{\sigma'_v \cos \alpha}$$

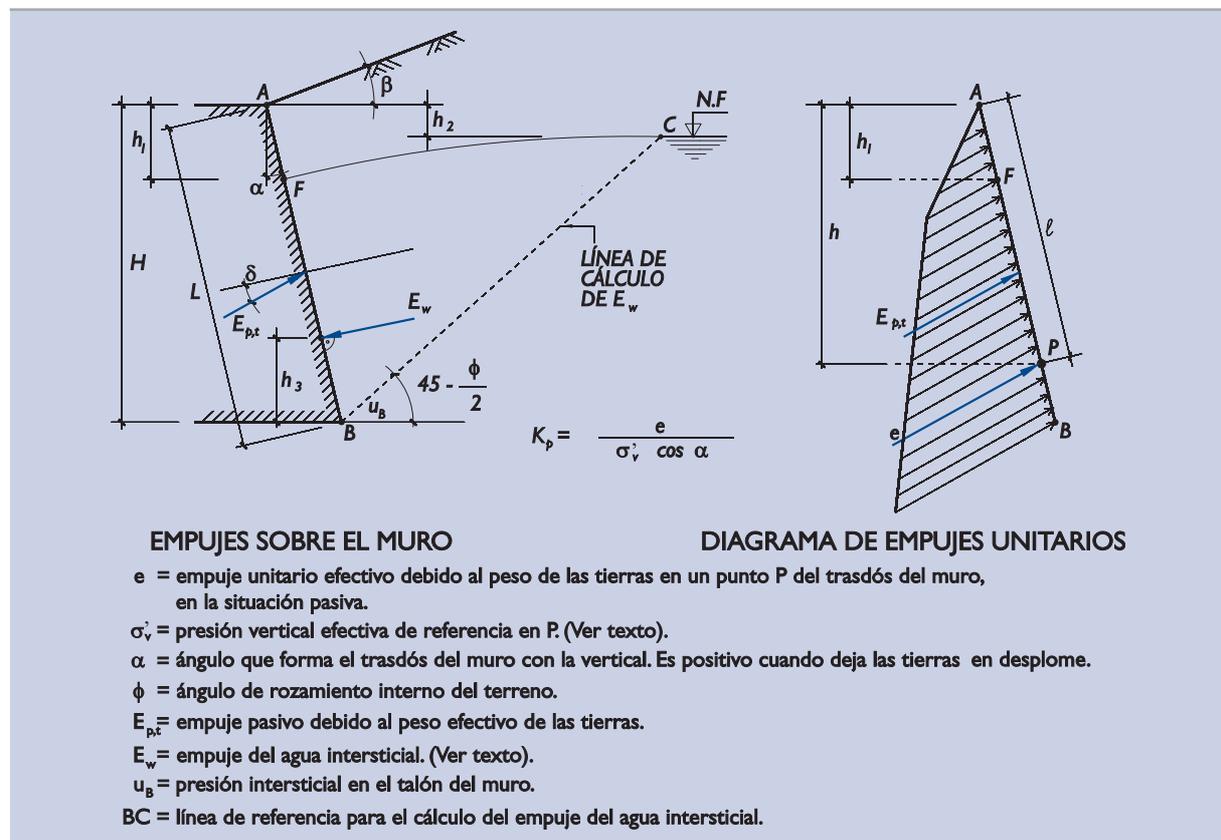
donde:

e = empuje efectivo del terreno contra el muro cuando se produce la rotura.

σ'_v = presión vertical efectiva de referencia.

α = desviación respecto a la vertical del paramento del muro. Es positivo cuando deja a las tierras en desplome.

Figura 3.7.22. Definición del coeficiente de empuje pasivo en suelos granulares



La presión vertical de referencia que se utiliza aquí es la misma que se define en el apartado 3.7.5.1.

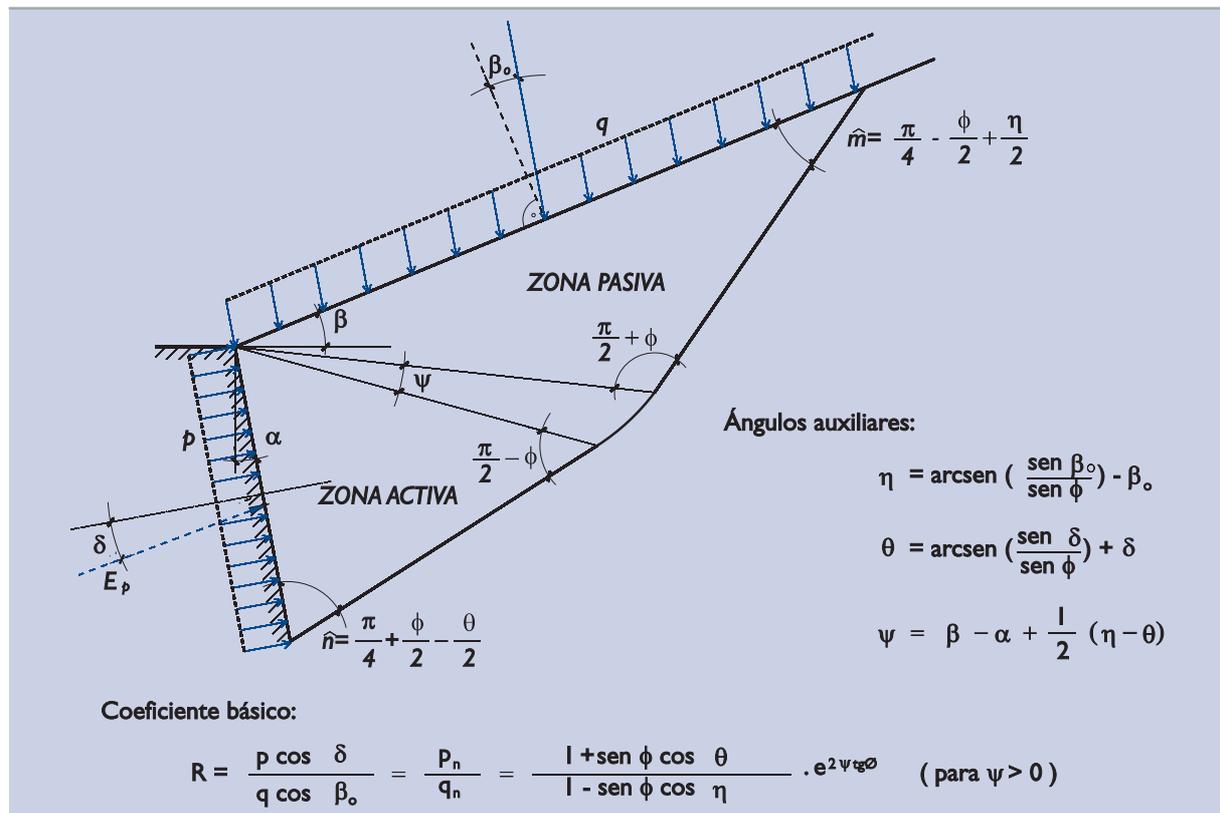
Como quiera que la definición de la presión vertical de referencia implica un determinado modo de considerar el efecto del agua, esa forma de proceder se debe de mantener en la posterior evaluación del empuje debido a la presión intersticial del agua.

3.7.7.2 Valor del coeficiente de empuje pasivo

El coeficiente de empuje pasivo no es una propiedad del terreno sino un parámetro de cálculo controlado principalmente por la resistencia al corte del terreno y que depende, además, de los ángulos característicos que definen la orientación del paramento del muro, la dirección del empuje y la inclinación del terreno.

La idea básica del método de evaluación del coeficiente de empuje pasivo es la teoría de la plasticidad, cuya expresión más simple se representa en la Fig. 3.7.23.

Figura 3.7.23. Teoría simplificada de la plasticidad aplicada al cálculo de empujes pasivos



Esta misma teoría es la utilizada para estudiar la carga de hundimiento de las cimentaciones superficiales y de la que se deducen los factores de capacidad de carga que se citan en el apartado 3.5.

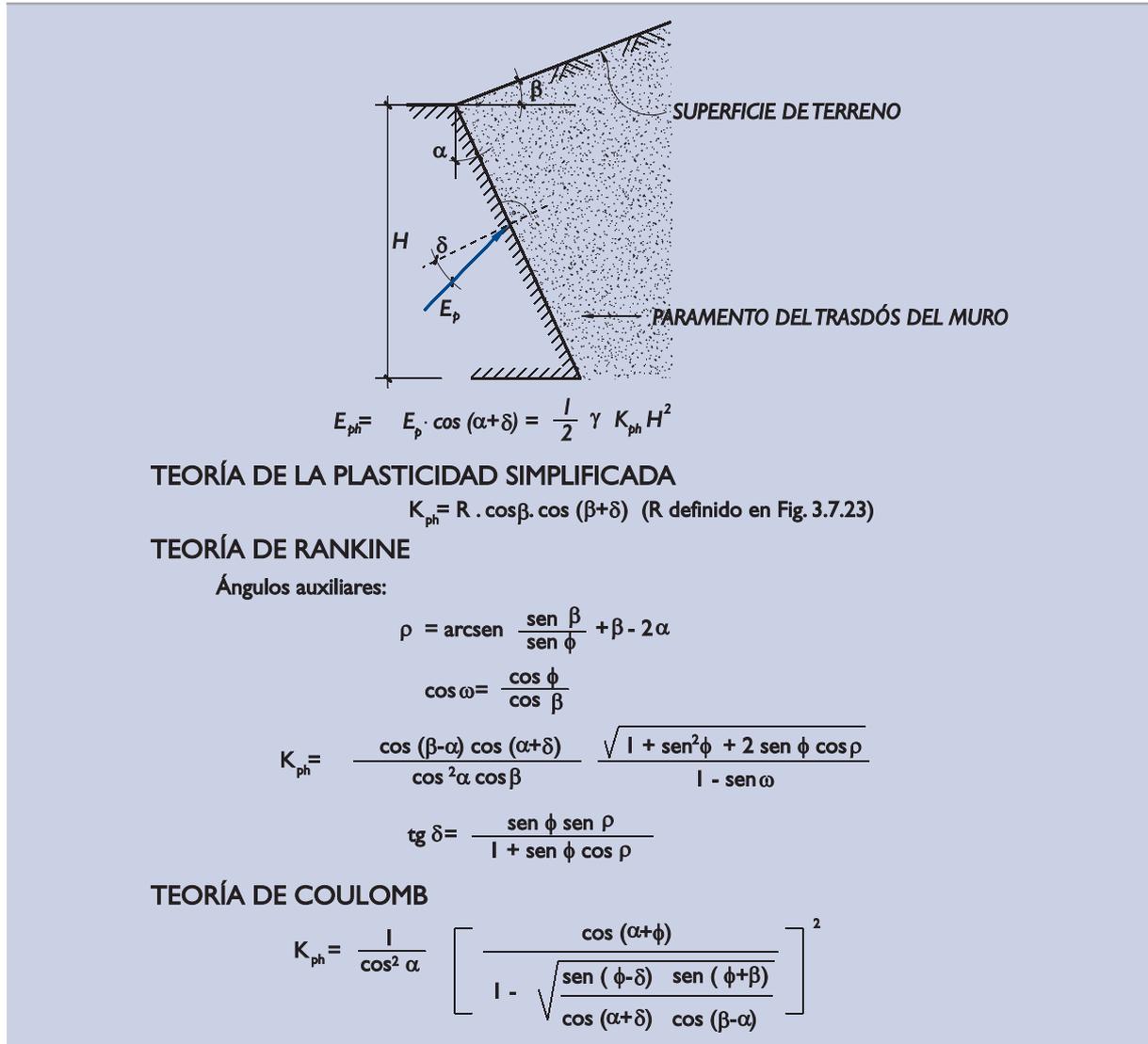
Con esa base teórica y con un esquema de extrapolación teoría-realidad similar al que se hizo para el caso de las cargas de hundimiento, se pueden recomendar los coeficientes de empuje pasivo horizontal:

$$K_{ph} = K_p \cdot \cos(\alpha + \delta)$$

que se indican en la Fig. 3.7.24.

Los métodos de Rankine y de Coulomb, considerados en el cálculo del coeficiente de empuje activo, permiten también el cálculo del coeficiente de empuje pasivo sin más que cambiar el signo al ángulo de rozamiento interno.

Figura 3.7.24. Coeficientes de empuje pasivo



Existen, sin embargo, razones para no aplicar de manera general la teoría de la plasticidad que se comenta en el cálculo de empujes activos (ya se citaron en el apartado 3.7.5.2) y existen razones para no utilizar sistemáticamente ni el método de Coulomb ni el método de Rankine en el cálculo de coeficiente de empuje pasivo. Esas razones se exponen a continuación.

Como se ha dicho, la línea de rotura observada en las roturas pasivas dista mucho de ser plana, sin embargo, tanto el método de Coulomb como el de Rankine implican una rotura plana.

De la misma forma, la teoría de la plasticidad sería aplicable al cálculo del empuje activo. La misma expresión analítica que da el coeficiente de empuje pasivo sería válida, sin más que cambiar el signo al ángulo de rozamiento interno, para obtener el coeficiente de empuje activo.

El empuje pasivo suele estar asociado a ángulos “ δ ” negativos y eso hace que las líneas de rotura sean claramente curvas. En aquellos casos en que hayan de calcularse empujes pasivos correspondientes a inclinaciones “ δ ” pequeñas, cualquiera de estos dos métodos (Rankine o Coulomb) es aplicable. Es más, cuando el ángulo central de la cuña de plasticidad radial (ángulo Ψ de la Fig. 3.7.23) sea negativo, conviene utilizar alguno de estos métodos, ya que el modelo geométrico de la rotura plástica deja de ser válido.

En líneas generales el método de Coulomb se considera aplicable siempre que el ángulo de inclinación del empuje respecto al muro sea nulo y el terreno de trasdós sea prácticamente horizontal. El método de Coulomb (o el de Rankine) habrán de aplicarse cuando el ángulo “ δ ” sea positivo y el trasdós del muro y el terreno formen entre sí un ángulo recto o de menor amplitud. Esto es, cuando $\alpha > \beta$ y simultáneamente $\delta > 0$.

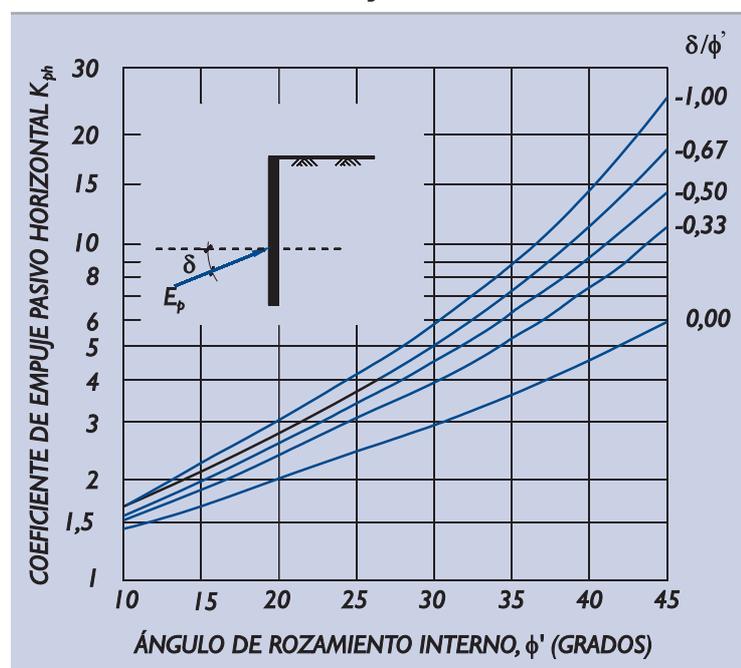
A efectos de facilitar el cálculo del empuje pasivo, se adjuntan una serie de gráficos donde se indican los valores del coeficiente de empuje pasivo horizontal, K_{ph} , deducidos de la teoría de la plasticidad.

En la Fig. 3.7.25 se indican valores de K_{ph} en el eje de ordenadas frente al valor del ángulo de rozamiento ϕ en abscisas, para varios valores del ángulo de desviación del empuje respecto a la normal al muro, ángulo δ . Los datos de esta figura corresponden a muros de trasdós vertical ($\alpha = 0$) y rellenos de superficie horizontal ($\beta = 0$).

Como puede observarse, únicamente se consideran ángulos “ δ ” negativos (como caso extremo se incluye $\delta = 0$). Para valores positivos del ángulo “ δ ” esta teoría no es aplicable, y sería necesario aplicar la fórmula del método de Coulomb o de Rankine. De entre estas últimas se debe elegir una u otra con criterio semejante al que se cita en 3.7.5.2 al comparar estos métodos.

En la Fig. 3.7.26 se dan valores del coeficiente de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales que empujan sobre terrenos con pendiente. En esas figuras se incluyen pendientes positivas y negativas. Para valores del ángulo β menores que los indicados en la figura, este método dejaría de ser aplicable y habría de utilizarse la solución de Coulomb o de Rankine.

Figura 3.7.25. Coeficiente de empuje pasivo horizontal, K_{ph} , para muros verticales y relleno de trasdós horizontal



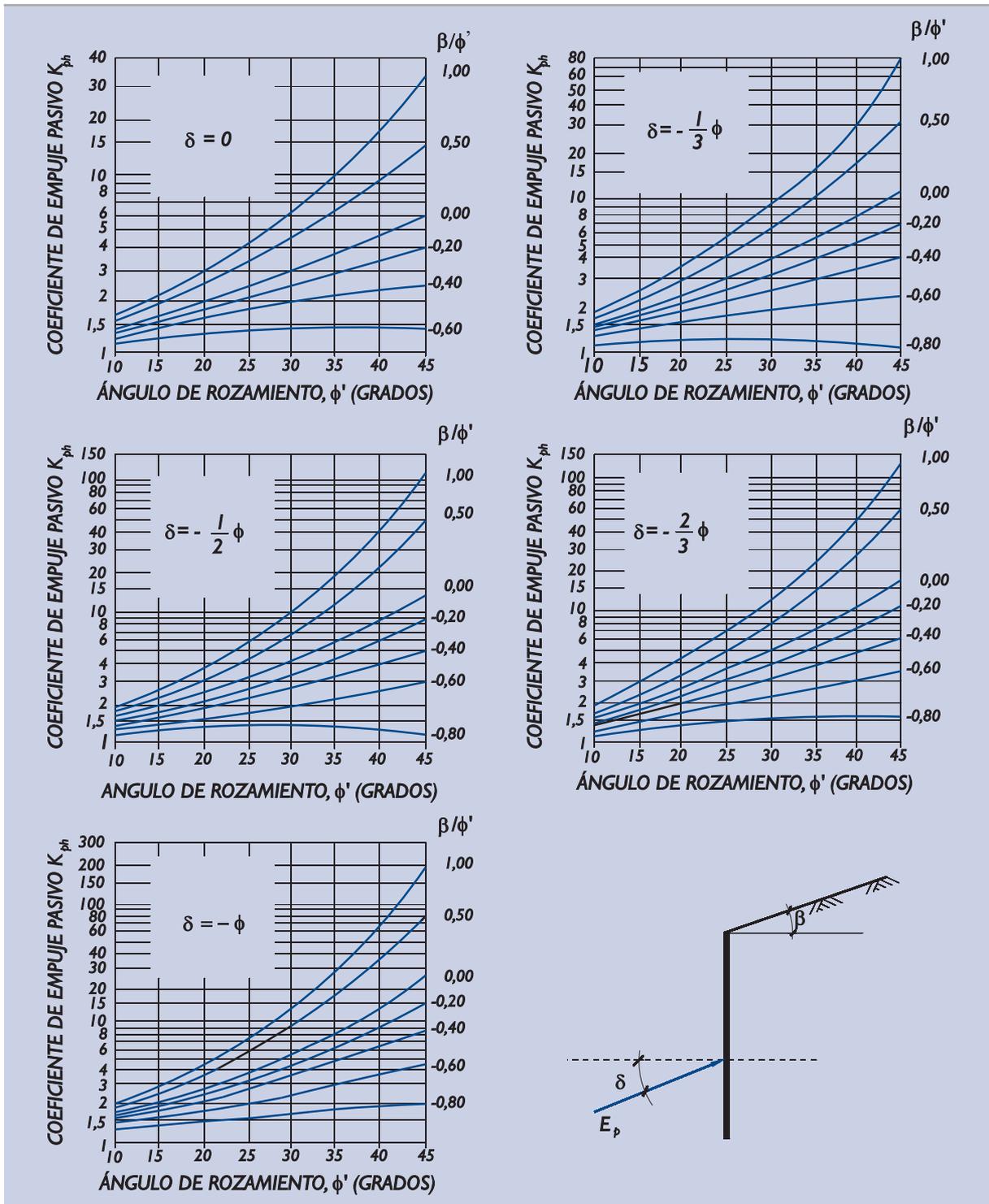
Nota: Sólo se incluyen datos para valores negativos del ángulo “ δ ”. Para valores positivos ver texto.

3.7.7.3 Cálculo del empuje pasivo

El cálculo del empuje pasivo por el procedimiento basado en el concepto de coeficiente de empuje pasivo que se viene describiendo en este apartado 3.7.7 requiere la consideración separada de varias componentes del empuje. Son el empuje efectivo debido al peso de las tierras, el empuje del agua, el incremento de empuje debido a la cohesión y el incremento de empuje debido a las sobrecargas.

El empuje efectivo debido al peso del terreno se puede calcular integrando a lo largo del paramento del muro la ley de las componentes horizontales del empuje unitario. El cálculo es en todo semejante al descrito en el apartado 3.7.5.3 para los empujes activos horizontales sin más que cambiar K_{ah} por K_{ph} .

Figura 3.7.26. Coeficientes de empuje pasivo horizontal K_{ph} para muros verticales



Conocida la componente horizontal del empuje se puede determinar la componente vertical, ya que la orientación del empuje es conocida.

El empuje debido al agua intersticial se obtiene por integración de la ley de presiones intersticiales en la línea de referencia BC que pasa por el pie del muro B y corta al nivel freático en el punto C. (ver Fig. 3.7.22). Esta línea

se supondrá inclinada un ángulo $45^\circ - (\phi/2)$ con la horizontal. En caso de varios terrenos es conservador, para estos cálculos, considerar el mayor valor de ϕ .

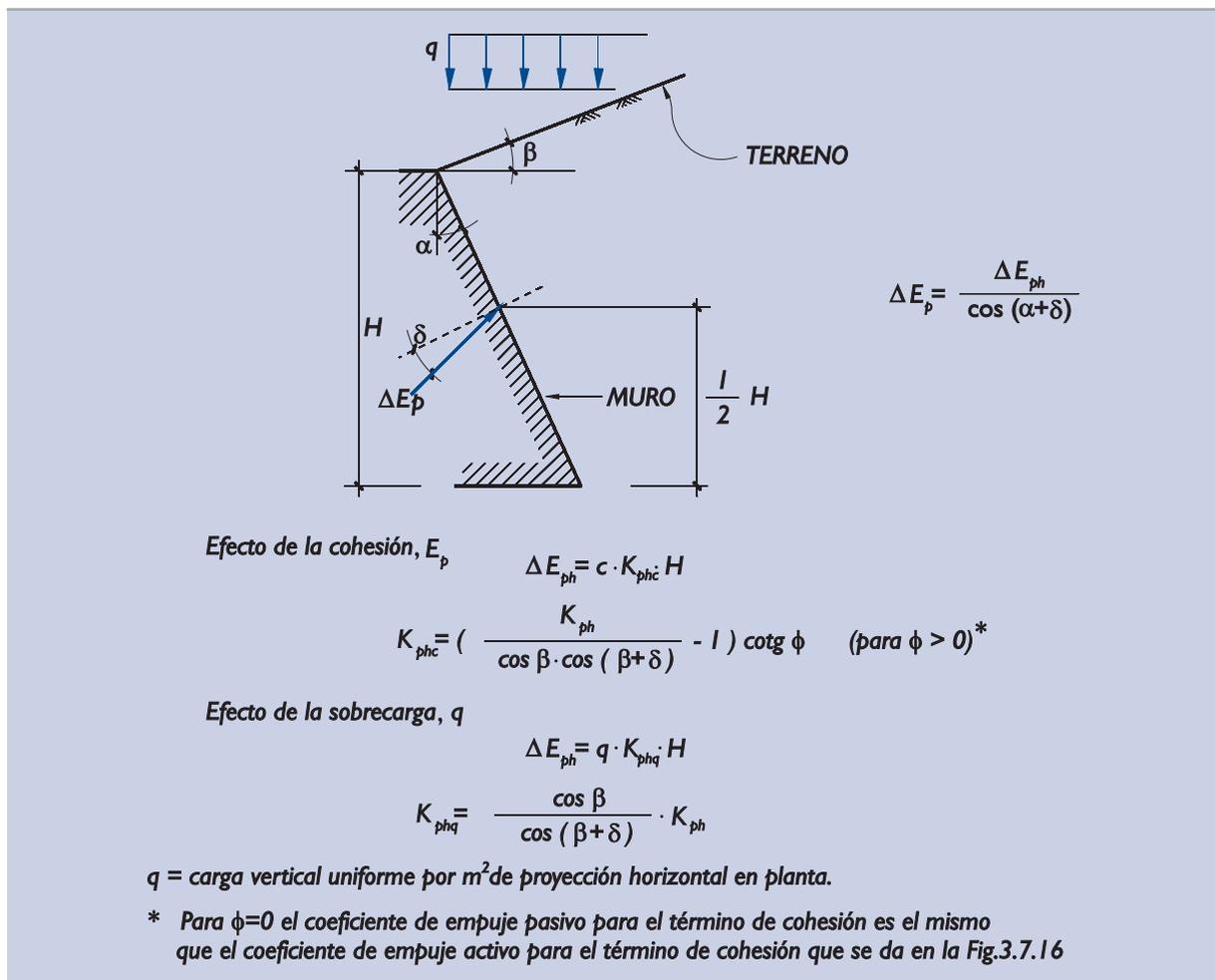
A excepción de la inclinación de esta línea AC, el cálculo del empuje del agua es en todo idéntico al indicado en el punto 3.7.5.4.

El aumento de empuje debido a la cohesión puede estimarse tal como se indica en el esquema de la Fig. 3.7.27.

El aumento de empuje debido a sobrecargas uniformes en coronación puede estimarse tal como se indica en esa misma figura.

Estos incrementos de empuje, según se indica en la figura, se calculan determinando, en primer lugar, su componente horizontal. La dirección conocida del empuje (desviado un ángulo “ δ ” respecto a la normal del muro) permitirá calcular la componente vertical correspondiente.

Figura 3.7.27. Efecto de la cohesión y las sobrecargas en el empuje pasivo



3.7.8 Cálculo del empuje al reposo

El cálculo del empuje al reposo puede ser necesario en la comprobación de algunos Estados Límite de Servicio así como en algunos estados límite asociados con el comportamiento estructural del muro.

El concepto teórico de empuje al reposo corresponde a la situación ideal de movimiento nulo del muro respecto al terreno. Esa situación puede darse en aquellos casos en los que las coacciones externas impiden el movimiento del muro. Muros bien cimentados en roca pueden estar sometidos a empujes similares a los de esa situación ideal.

El método de cálculo de empujes al reposo que se recomienda está basado en el concepto del coeficiente de empuje al reposo, K_o , que se define como cociente entre el empuje unitario efectivo causado por el peso de las tierras y la tensión efectiva vertical de referencia definida en el apartado 3.7.5.1. Esto es,

$$K_o = \frac{e}{\sigma'_v \cos \alpha}$$

En esa definición se indica una línea de referencia, BC, para considerar la influencia del agua (ver Fig. 3.7.11). Para este caso esa línea de referencia debe estar inclinada 45° respecto a la horizontal.

Teóricamente, si el esqueleto del suelo se comportase elásticamente, con el mismo módulo de Poisson, ν , durante todo el proceso de trasdosado del muro, el valor de K_o , sería:

$$K_{o(\text{elástico})} = \frac{\nu}{1 - \nu}$$

siendo ν el coeficiente de Poisson.

Pueden ocurrir, sin embargo, otros procesos anelásticos en la generación de las presiones horizontales. Por ese motivo se recomienda calcular el valor de K_o mediante la siguiente expresión analítica:

$$K_o = (1 - \sin \phi) \text{OCR}^{\frac{1}{2}}$$

donde:

OCR = razón de sobreconsolidación, definida en 2.2.10.2.

ϕ = ángulo de rozamiento.

En suelos granulares debe entenderse como razón de sobreconsolidación el cociente entre la presión equivalente de compactación y la presión efectiva vertical en las proximidades del trasdós del muro.

En la compactación de los suelos granulares se producen tensiones que equivalen a presiones estáticas de entre 1 y 3 bares, según la energía de compactación. Este rango de presiones permite obtener una idea de la razón de sobreconsolidación a utilizar en la fórmula anterior.

Teóricamente, en la superficie de un relleno granular compactado se alcanzan valores infinitos del parámetro OCR. El límite práctico recomendado para este parámetro es del orden de 2 (compactación ligera) a 4 (compactación intensa).

En suelos arcillosos puede seguirse el mismo procedimiento de evaluación pero considerando posibles valores más altos del parámetro OCR cerca de la superficie, de hasta 4 para compactaciones ligeras y 9 para compactaciones enérgicas.

El cálculo del empuje al reposo en muros con trasdós quebrado, con rellenos heterogéneos no compactos ($K_o < 1$), con superficies del terreno no horizontales y con varios tipos de sobrecargas puede hacerse mediante los procedimientos descritos en apartados anteriores, como si se tratara de un caso de empuje activo, pero con un ángulo de rozamiento virtual más bajo que el real. Se considera admisible, en esos casos, suponer un ángulo de rozamiento ficticio, $\phi_{\text{equivalente}}$, dado por la expresión:

$$\operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi_{\text{equivalente}}}{2} \right) = K_o$$

Normalmente la superficie externa del relleno tendrá una inclinación nula o moderada (ángulo β). Si ocurriese que $\phi_{\text{equivalente}} < \beta$ se encontraría una situación incompatible. En estos casos se recomienda, además de revisar las condiciones de estabilidad global de la obra, realizar el cálculo del empuje al reposo suponiendo $\phi_{\text{equivalente}} = \beta$.

En general, y salvo una justificación expresa, se supondrá que el empuje al reposo actúa sobre el plano de trasdós con un ángulo de desviación respecto a la normal, δ , igual al que resultaría de la aplicación del método de Rankine. Ver Fig. 3.7.6.

Tras determinar el valor del coeficiente de empuje al reposo y la orientación de su línea de acción se pueden calcular los empujes efectivos debidos al peso del terreno con los mismos procedimientos utilizados en el caso de empuje activo, tal como se explica en 3.7.5.3.

El empuje del agua debe calcularse tal como se indica en el apartado 3.7.5.4 sin más que cambiar la inclinación de la línea de referencia AC que, en este caso, estará inclinada 45° respecto a la horizontal.

El efecto que producen las sobrecargas sobre muros que no pueden moverse debe calcularse admitiendo la teoría de la elasticidad. En estos casos, la simulación de no deformación puede hacerse mediante la colocación de una carga virtual adicional simétrica de la real respecto al plano del trasdós del muro. Las soluciones publicadas en los textos de geotecnia permiten la resolución de un buen número de casos de carga.

Estas soluciones de la teoría de la elasticidad implican deformaciones verticales entre el muro y el terreno que, en general, no serán reales; a pesar de ello se consideran aplicables al caso.

3.7.9 Consideración de algunos casos singulares

La comprobación de los Estados Límite Últimos de carácter geotécnico requerirá el análisis de situaciones singulares no contempladas expresamente en los apartados precedentes. El ingeniero deberá definir el procedimiento de cálculo concreto aplicable a cada caso siguiendo, en lo posible, las recomendaciones precedentes.

En este apartado se consideran cuatro situaciones singulares que pueden producirse con alguna frecuencia. Los procedimientos de análisis que se recomiendan pueden servir de guía no sólo para ayudar al ingeniero en estos casos concretos, sino también para indicar ciertas ideas simplificadoras sobre cómo abordar otras situaciones similares.

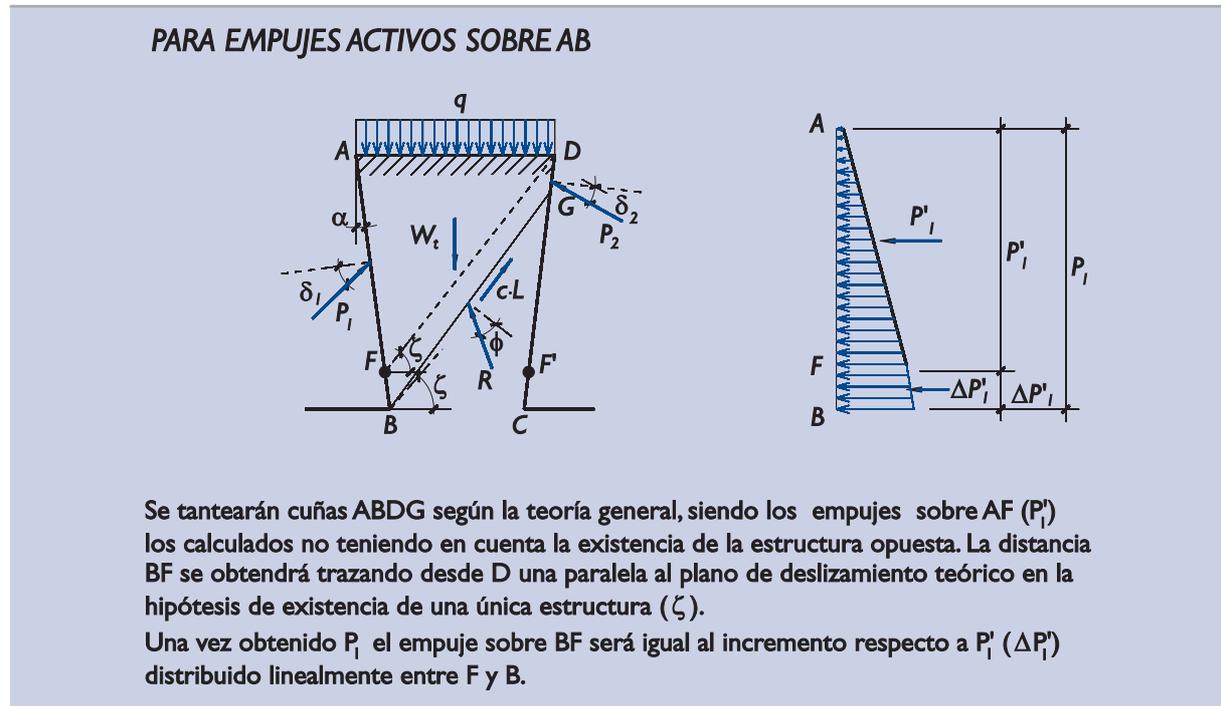
3.7.9.1 Empuje activo en muros paralelos

La situación de dos muros paralelos sobre los que actúa simultáneamente el empuje activo provocado por un trasdós común a ambos puede darse en algunos puntos concretos de obras portuarias. Ocurre en los muros laterales de contención de terraplenes estrechos que se construyen como accesos a puentes de gran altura.

El cálculo del empuje activo sobre dos muros paralelos se ilustra esquemáticamente en la Fig. 3.7.28 donde, además, se describe el proceso de cálculo recomendado.

El cálculo del empuje, en cada uno de los muros, es independiente de la presencia del otro hasta una cierta profundidad (punto F de la figura) en la que comienza el proceso de interferencia.

Figura 3.7.28. Empuje activo sobre muros paralelos próximos



El cálculo del empuje en la zona inferior (tramo FB en la figura) ha de hacerse por algún procedimiento aproximado. El que se describe en la Fig. 3.7.28 es suficientemente exacto, aunque su aplicación exige que exista una separación mínima entre los muros de manera que el punto "G" esté situado dentro de la zona donde no existe interferencia en el empuje entre muros. Esto es, por encima del punto F' del muro derecho, que sería el homólogo del punto F que se indica en esa figura.

Cuando los muros están tan próximos que ese efecto llega a ocurrir, el empuje sobre la parte inferior bajo la zona de interferencia ($\Delta P'$ en la mencionada figura) puede calcularse con la expresión:

$$\Delta P'_1 = \left[\frac{\frac{1}{2} W - \frac{1}{8} d^2 \operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg}(\alpha + \delta)} \right] - P'_1$$

donde:

- W = peso efectivo total del relleno más la componente vertical de posibles cargas y sobrecargas.
- d = distancia horizontal entre el talón de los muros (distancia BC en la figura).

Este procedimiento simplificado implica que todo el peso del relleno y las sobrecargas es soportado por la componente vertical de los empujes, excepto el correspondiente a una pequeña cuña inferior de base plana BC y ángulo ϕ en B y en C.

Cuando alguno de los dos ángulos α o δ , o ambos simultáneamente, son pequeños, la expresión anterior puede conducir a empujes muy altos. En esos casos el mecanismo de rotura es diferente y el empuje sobre cada muro tiene un límite superior, que es el correspondiente al cálculo general suponiendo que el otro muro no existe.

El efecto silo, correspondiente a la rotura del material quedando fijas las paredes, es en cierto modo semejante a la situación creada por dos muros paralelos muy próximos y las soluciones de la teoría del efecto silo pueden ayudar en la evaluación de los empujes. El efecto silo se comenta con algún detalle en el apartado 3.7.9.4.

3.7.9.2 Pantallas de anclaje enterradas

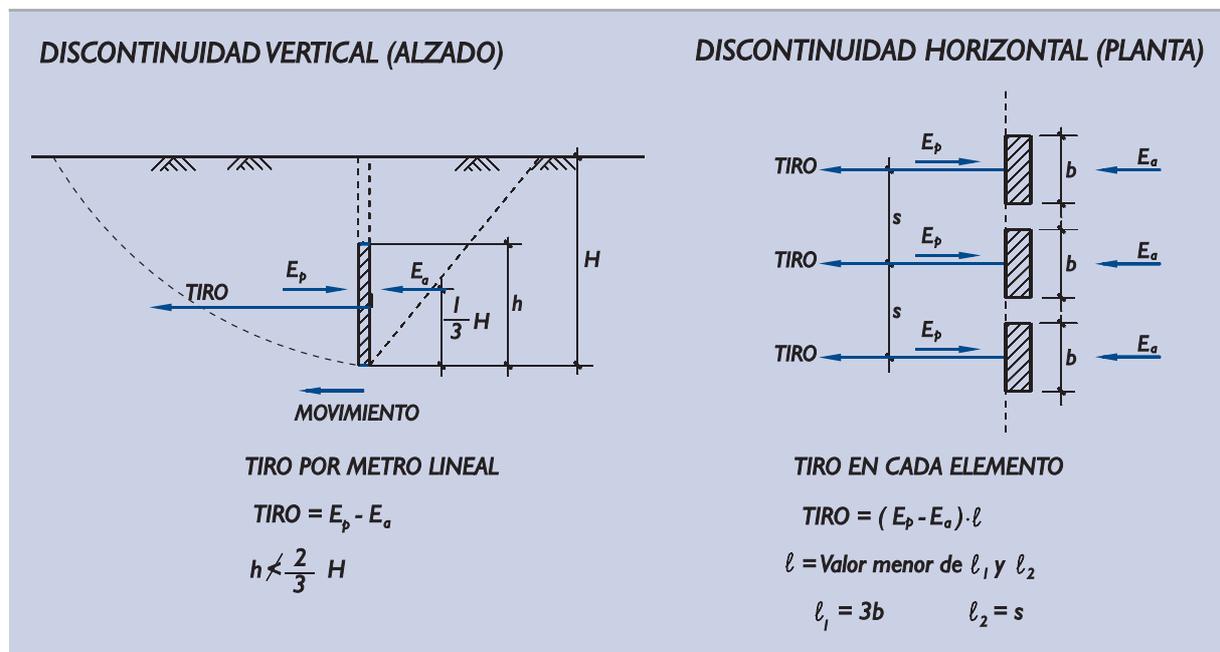
Los muros de contención de tipo pantalla requieren, en general, ser soportados mediante anclajes. Estos anclajes pueden transferir la carga a estructuras enterradas de diversa tipología.

Una situación relativamente frecuente es el caso de pantallas discontinuas, ya sea en sentido vertical, porque no llegan hasta la superficie del terreno, ya sea en sentido horizontal porque la separación entre anclajes es bastante elevada.

En la Fig. 3.7.29 se indican esquemáticamente soluciones aproximadas que pueden adoptarse en el cálculo de los tiros correspondientes.

Cuando la discontinuidad vertical es tal que el elemento enterrado tiene una altura inferior $2/3$ de la altura total, la simplificación indicada puede conducir a resultados muy optimistas. Otras aproximaciones más convenientes se indican en el apartado 4.4.5.3.

Figura 3.7.29. Cálculo del tiro en algunas estructuras discontinuas



3.7.9.3 Pilotaje en el trasdós de los muros

El soporte de caminos de rodadura de las grúas que suelen existir en los muelles lleva a situaciones similares a la indicada en el esquema de la Fig. 3.7.30. Otros motivos pueden conducir a situaciones análogas.

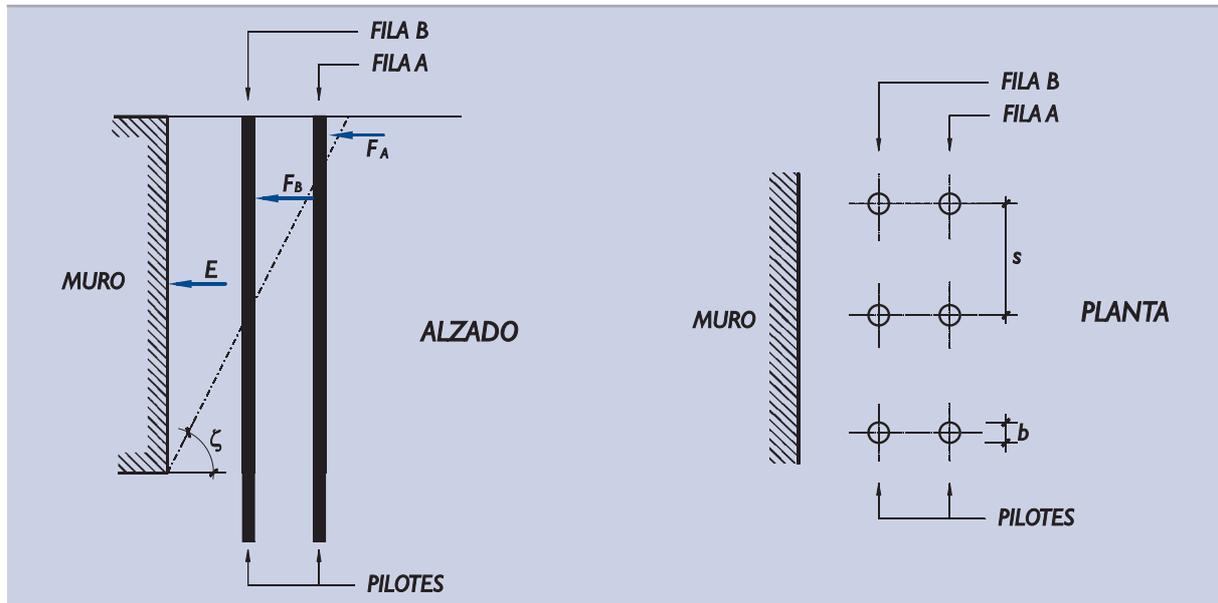
La estimación de empujes activos debe hacerse, en estos casos, por algún procedimiento simplificado, ya que no existe ninguna solución analítica sencilla que permita el cálculo directo de los empujes.

El cálculo del empuje activo puede realizarse suponiendo varias líneas de rotura, que en la figura, a efectos de simplificar la idea, se ha supuesto plana. En problemas con trasdós heterogéneo la línea de rotura más desfavorable puede ser quebrada.

Cada línea de rotura dará origen al cálculo de varias rebanadas verticales (ver apartado 3.7.4). En este caso, algunos planos de separación de esas rebanadas deben coincidir con los pilotes.

El cálculo de cada rebanada conduce a un empuje en el contacto entre rebanadas, alguno de los cuales corresponderá al plano del primer pilotaje (fila A).

Figura 3.7.30. Empujes sobre pilotes en el trasdós de un muro



El empuje activo sobre la alineación externa se supondrá igual al mayor valor de los dos siguientes:

$$F_A = E_A \cdot s$$

ó

$$F_A = E_A \cdot 3b$$

Para el cálculo de la rebanada siguiente se supondrá que el empuje de la rebanada anterior, E_A , se modifica al valor E_A^* , dado por:

$$E_A^* = E_A - \frac{F_A}{s}$$

El cálculo de las rebanadas siguientes debe proseguirse de la manera general hasta la rebanada cuya cara vertical izquierda (más próxima al muro) coincida con la siguiente alineación del pilotaje.

Con el empuje en esa cara se pueden calcular el empuje sobre esa alineación del pilotaje y el empuje transmitido a la rebanada siguiente.

El empuje soportado por el pilotaje sería el menor de los dos siguientes:

$$F_B = E_B \cdot s$$

$$F_B = E_B \cdot 3b$$

El empuje transmitido por el terreno a la rebanada siguiente sería:

$$E_B^* = E_B - \frac{F_B}{s}$$

La continuación del proceso conduciría a definir el empuje sobre el muro.

Se deben tantear, en este proceso, varias líneas de rotura posibles, siempre inclinadas respecto a la horizontal un ángulo superior al ángulo de rozamiento del terreno.

Se acepta, como simplificación, definir como empuje activo en cada pilote y en el muro aquel valor que, en cada elemento, resulte máximo durante el proceso de tanteo. Esto ocurrirá, en general, para cada uno de los elementos, con una línea de rotura diferente.

3.7.9.4 Efecto silo

Los materiales ensilados ejercen presiones sobre las paredes de los silos que pueden estimarse mediante procedimientos similares a los casos de empuje activo. Al vaciar los silos por su parte inferior, el material que lo rellena se rompe movilizando completamente su resistencia en el contacto con las paredes.

Otra situación típicamente portuaria, que podría ser similar a la de los silos, se produce en el relleno de las celdas estrechas y altas en los cajones prefabricados y fondeados. El asiento del propio relleno, a medida que se va realizando, moviliza el rozamiento tierras-pared y descarga las tensiones verticales en el fondo.

Por ese motivo ha parecido bien recoger en esta ROM 0.5 la solución clásica del efecto silo que se describe a continuación.

En esta teoría se supone que el material ensilado se comprime contra las paredes con una tensión cuyas componentes son σ_n y τ , tal que:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\tau}{\sigma_n}$$

siendo δ el ángulo de rozamiento entre el material ensilado y las paredes del silo.

La presión vertical sobre planos horizontales, que aquí se denomina p_v , será menor que la correspondiente al peso de toda la altura de material ensilado, ya que parte de la carga vertical se transmite por rozamiento a las paredes del silo.

Por otro lado, ha de suponerse que existe una relación entre la componente horizontal del empuje contra las paredes y la presión vertical. Esa relación es:

$$\sigma_n = K_{oh} \cdot p_v$$

donde K_{oh} es un coeficiente de empuje horizontal en condiciones similares a las del reposo, ya que las paredes no se mueven. Ese coeficiente sería similar al que corresponde a un muro vertical ($\alpha = 0$) con terreno de trasdós horizontal ($\beta = 0$) de un material puramente friccional cuyo ángulo de rozamiento sea el del material ensilado y que actúa formando un ángulo δ respecto a la normal, positivo (componente de rozamiento hacia abajo) e igual al del rozamiento entre el material ensilado y las paredes del silo.

La solución de la ecuación de equilibrio vertical conduce a la siguiente expresión de la presión vertical.

$$p_v = \gamma \cdot z_o \cdot \left(1 - e^{-\frac{z}{z_o}}\right) + q \cdot e^{-\frac{z}{z_o}}$$

donde:

- γ = peso específico del material ensilado.
- z = profundidad medida desde la superficie superior del material ensilado.
- z_o = profundidad de referencia.
- q = sobrecarga que, eventualmente, pueda existir en superficie.

La profundidad de referencia, z_o , depende de las dimensiones del silo, de la resistencia del material y de la resistencia del contacto del material ensilado con la pared del silo. Viene dada por la expresión siguiente:

$$z_o = \frac{A}{K_{oh} P \operatorname{tg} \delta}$$

donde:

A = área de la sección recta de la celda del silo.
P = perímetro interior del silo.

y donde K_{oh} y δ tienen los significados antes mencionados.

Esta solución permite calcular no sólo " p_v " a cualquier profundidad " z ", sino también otras tensiones de interés tales como " σ_n " y " τ ", directa y proporcionalmente relacionadas con ella, como se ha indicado en los párrafos precedentes.

Conviene completar este apartado del efecto silo añadiendo algunas consideraciones sobre los valores adecuados de los parámetros de cálculo.

Para rellenos granulares, excepto pedraplenes y escolleras, se recomienda utilizar:

$K_{oh} = 0,5$ En procesos de llenado del silo.
 $K_{oh} = 1,0$ En procesos de vaciado del silo.

y como valores del ángulo " δ "

$\delta = 0,75 \phi$ En procesos de llenado.
 $\delta = 0,60 \phi$ En procesos de vaciado.

siendo ϕ el ángulo de rozamiento interno del relleno.

En materiales pulverulentos se debe adoptar $\delta = \phi$, ya sea en procesos de llenado como en procesos de vaciado.

Para tener en cuenta los efectos dinámicos que se producen durante el vaciado, será necesario mayorar los empujes obtenidos según la formulación anterior por 1,50.

Las leyes de empuje teóricas podrán simplificarse en el cálculo adoptando valores envolventes del lado de la seguridad.

3.7.10 Empuje sobre entibaciones

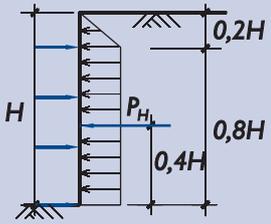
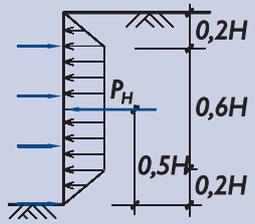
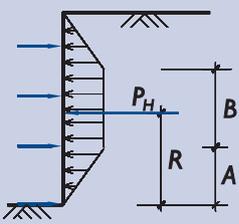
En las excavaciones en zanja los empujes sobre las entibaciones son poco parecidos a las leyes trapezoidales típicas de los empujes activos y pasivos utilizados en los cálculos de los apartados precedentes.

En los casos de obras de cierta envergadura puede ser necesario recurrir a un cálculo complejo que simule el proceso de ejecución de la obra mediante modelos de elementos finitos o mediante modelos de muelles como el indicado en el apartado 3.7.11.2.

En la mayoría de los casos, sin embargo, no será preciso un cálculo complejo y bastará con una aproximación sencilla.

Las leyes de empuje que deben suponerse en estos casos son las deducidas de la observación de empujes en este tipo de obras. En la Fig. 3.7.31 se indican leyes de empuje recomendables.

Figura 3.7.31. Empujes del terreno sobre entibaciones

SUELOS GRANULARES SUELTOS	SUELOS GRANULARES DENSOS	SUELOS COHERENTES
 <p data-bbox="239 716 510 761">$0,8 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot \cos \delta$</p> <p data-bbox="239 772 510 828">$P_H = 0,72 K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \cos \delta$</p>	 <p data-bbox="670 716 925 761">$0,8 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H \cdot \cos \delta$</p> <p data-bbox="670 772 925 828">$P_H = 0,64 K_a \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot \cos \delta$</p>	 <p data-bbox="1053 716 1292 761">σ_H</p> <p data-bbox="1053 784 1292 828">$2 < N_0 < 5$</p> <p data-bbox="1053 840 1292 873">$P_H = 0,78 \cdot H \cdot \sigma_H$</p> <p data-bbox="1053 873 1292 907">$\sigma_H = \gamma \cdot H - 1,5 (1 + N_0) \cdot c$</p> <p data-bbox="1053 907 1292 940">$A = 0,15H; B = 0,55H; R = 0,46H$</p> <p data-bbox="1053 963 1292 996">$5 < N_0 < 10$</p> <p data-bbox="1053 1008 1292 1041">$P_H = 0,78 \cdot H \cdot \sigma_H$</p> <p data-bbox="1053 1041 1292 1075">$\sigma_H = \gamma \cdot H - 4c$</p> <p data-bbox="1053 1075 1292 1108">$A = 0,15H; B = 0,55H; R = 0,46H$</p> <p data-bbox="1053 1153 1292 1187">$10 < N_0 < 20$</p> <p data-bbox="1053 1198 1292 1232">$P_H = (21 - 0,055N_0) \cdot H \cdot \sigma_H$</p> <p data-bbox="1053 1243 1292 1276">$\sigma_H = \gamma \cdot H - (8 - 4N_0) \cdot c$</p> <p data-bbox="1053 1276 1292 1310">$A = (3 - 0,015N_0) \cdot c$</p> <p data-bbox="1053 1310 1292 1344">$B = (1,1 - 0,055N_0) \cdot H$</p> <p data-bbox="1053 1344 1292 1377">$R = 0,38H$</p> <p data-bbox="1053 1422 1292 1456">$N_0 > 20$</p> <p data-bbox="1053 1467 1292 1500">$P_H = 0,5 \cdot H \cdot \sigma_H$</p> <p data-bbox="1053 1500 1292 1534">$\sigma_H = \gamma \cdot H$</p> <p data-bbox="1053 1534 1292 1568">$A = B = 0$</p> <p data-bbox="1053 1568 1292 1601">$R = 0,33H$</p>
<p data-bbox="239 1366 399 1400">LEYENDA :</p> <p data-bbox="239 1400 606 1444">N_0 (número de estabilidad) = $\frac{\gamma \cdot H}{c}$</p> <p data-bbox="239 1444 638 1478">γ : peso específico aparente del suelo.</p> <p data-bbox="239 1478 941 1512">H : altura del elemento de contención sobre la base de la excavación.</p> <p data-bbox="239 1512 399 1545">c : cohesión.</p> <p data-bbox="239 1545 574 1579">K_a : coeficiente de empuje activo.</p> <p data-bbox="239 1579 654 1612">δ : ángulo de rozamiento terreno-pared.</p>		

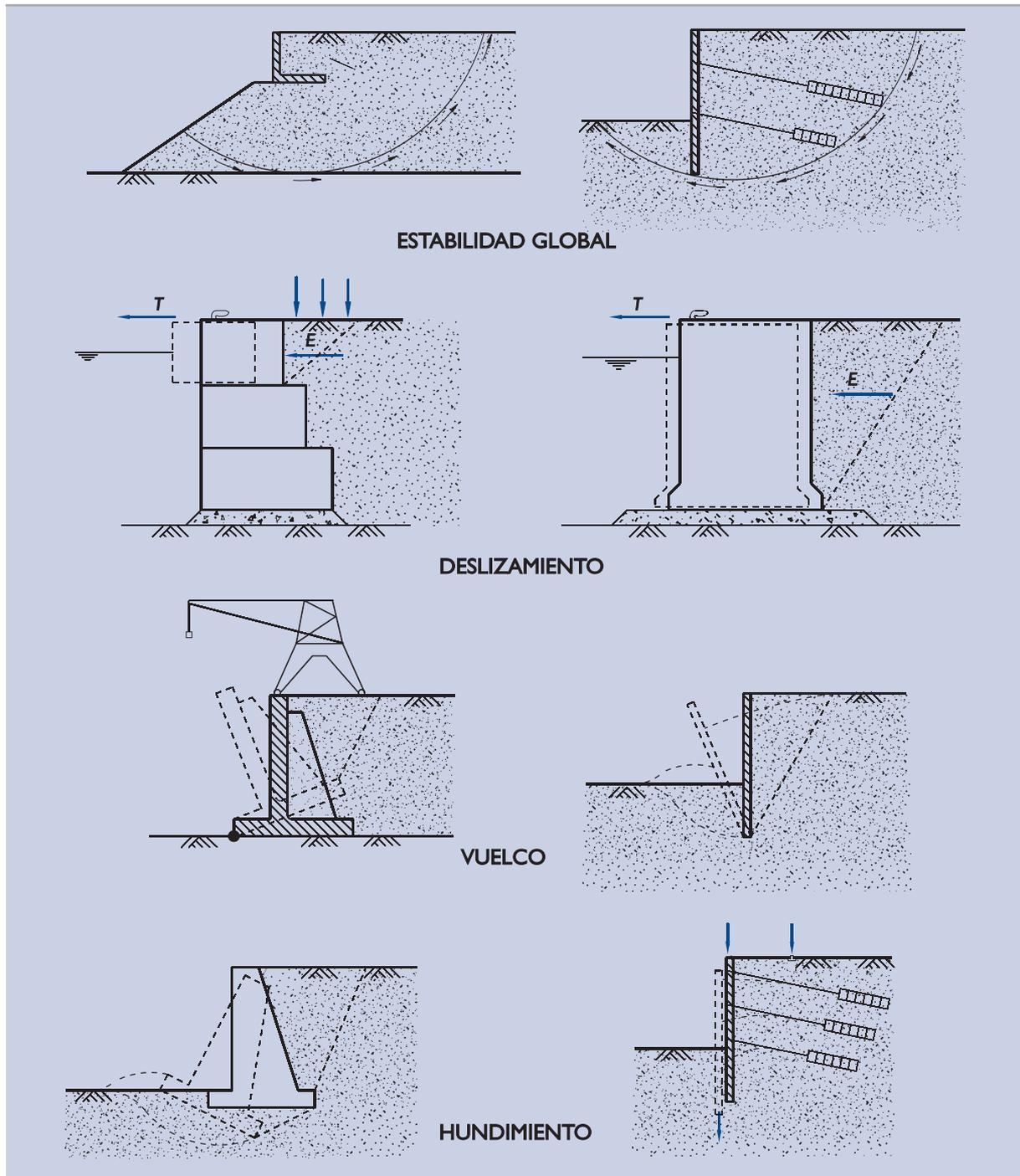
3.7.11 Modos de fallo más usuales de las estructuras de contención

3.7.11.1 Estados Límite Últimos

Los modos de fallo ⁽¹⁷⁾ que pueden provocar la ruina de la obra de contención en los que la resistencia del terreno tiene el papel preponderante son:

(17) Para facilitar la descripción de los distintos modos de fallo se incluyen unos croquis que los intentan representar. Ver Fig. 3.7.32.

Figura 3.7.32. Esquema de algunos modos de fallo



ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS DE TIPO GEOTÉCNICO GEO

a. Estabilidad global

La obra de contención y el terreno que la rodea pueden fallar globalmente, unidos, debido a un deslizamiento profundo causado por zonas del terreno que pueden no estar en contacto, ni próximas, a la estructura de contención.

Este mecanismo de fallo se debe analizar por los procedimientos generales que se explican en el apartado 3.8.

b. Deslizamiento

El mecanismo de fallo más común en estructuras de contención de tipo gravedad es el deslizamiento de la estructura de contención según el plano de cimentación, cuando ésta es superficial.

Este mecanismo de rotura se describe en el apartado 3.5 correspondiente a cimentaciones superficiales.

c. Vuelco

El vuelco es un mecanismo de fallo de estructuras de contención de gravedad cimentadas superficialmente sobre terrenos firmes. En suelos blandos la rotura por hundimiento ocurre antes del vuelco.

En los muros pantalla pueden darse distintas situaciones de rotura asimilables al vuelco cuando fallan los anclajes o falla la zona de empotramiento.

d. Hundimiento

Cuando las cargas actuantes sobre el cimiento de una obra de contención de gravedad superan la capacidad portante del terreno se produce el hundimiento que, en general, se traduce en un asiento, un desplazamiento y un giro.

Dado que las cargas sobre los cimientos de los muros son en general inclinadas y en muchas ocasiones excéntricas, la capacidad portante del terreno, en las cimentaciones superficiales, o la capacidad resistente del pilotaje, en caso de cimentaciones profundas, es un tema que requiere una atención especial.

Las cargas de hundimiento de distintos tipos de cimentaciones se analizan en los apartados 3.5 y 3.6.

En los muros pantalla pueden darse situaciones similares a las del hundimiento cuando las cargas verticales son grandes. Esto puede ocurrir cuando se disponen anclajes orientados hacia abajo o cuando el ángulo “ δ ” es grande o cuando se colocan cargas verticales sobre su cabeza.

e. Levantamiento del fondo

Además de los mecanismos generales descritos existen algunos particulares de las estructuras de contención utilizadas para entibar excavaciones.

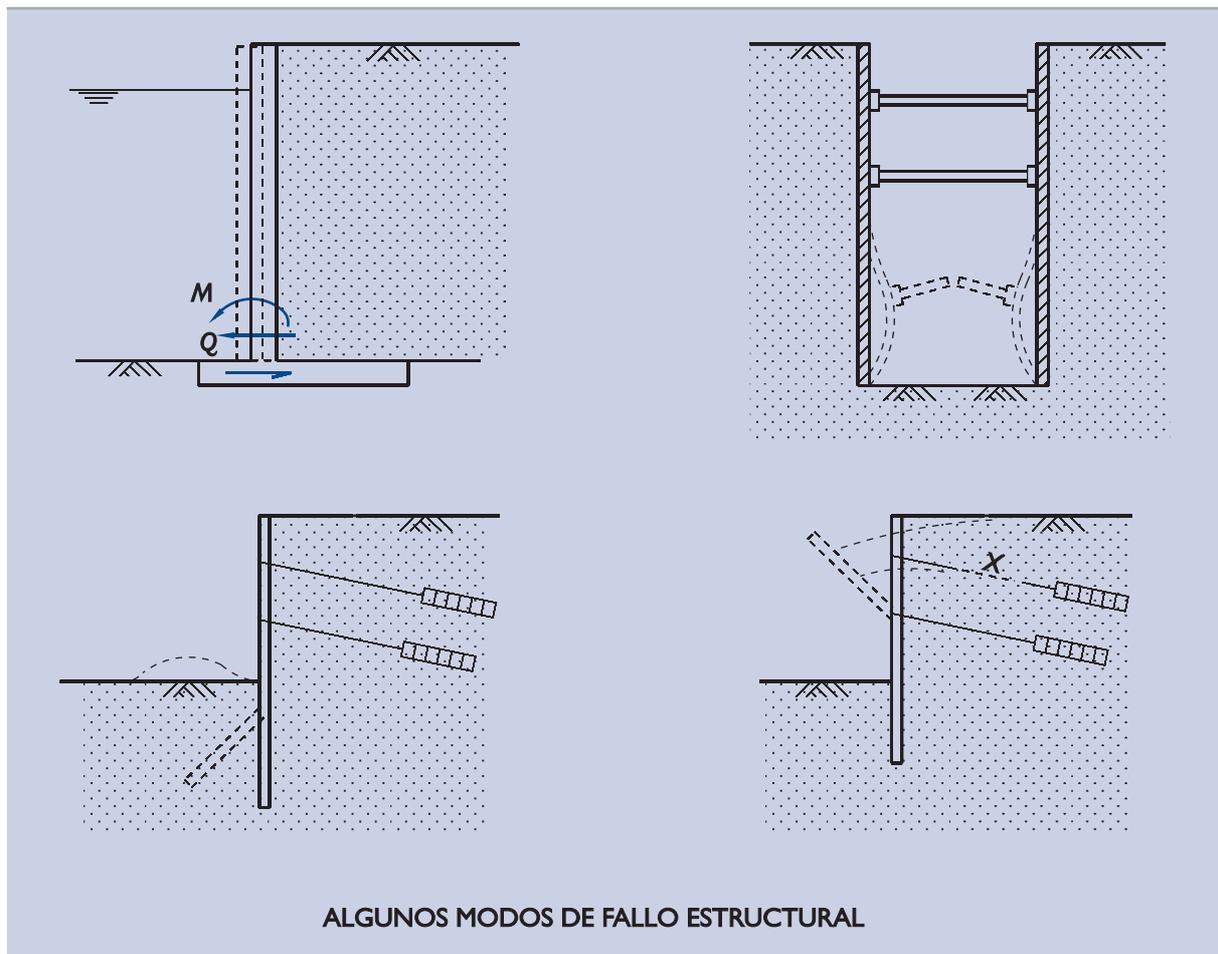
Cuando el suelo es poco resistente y la entibación, como suele ser normal, no se prolonga más allá del fondo de excavación, puede producirse el levantamiento del fondo con hundimiento simultáneo del terreno en el trasdós de la excavación.

Un problema similar puede ocurrir por el efecto de las filtraciones verticales hacia arriba en el pie de los muros pantalla (lado de intradós). El problema es también conocido con el nombre de “sifonamiento”.

ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS DE TIPO ESTRUCTURAL STR

Los fallos estructurales de los elementos de contención son de especial importancia. Alguno de ellos se representan en la Fig. 3.7.33. El estudio de este tipo de fallos, por agotamiento de la capacidad resistente de la estructura, se sale del ámbito de esta ROM.

En los muros de hormigón en masa pueden producirse tracciones o esfuerzos de corte que provoquen su rotura y el deslizamiento de una parte del muro sobre otra.

Figura 3.7.33. Esquema de algunos modos de fallo estructural

En los muros de hormigón armado el cálculo estructural está estrechamente ligado a los empujes del terreno. En el apartado 3.7.8 se dan recomendaciones sobre el proceso de estimación de empujes al reposo que permitirían evaluar los esfuerzos estructurales en condiciones próximas a las de servicio.

Las pantallas flexibles y, sobre todo, sus anclajes han de tener capacidad resistente suficiente para soportar directamente los empujes y transmitirlos a las zonas alejadas del peligro de inestabilidad global.

El fallo estructural de las entibaciones, ya sea en los elementos en contacto con el terreno, por flexión o corte, o en los puntales o codales, por compresión excéntrica, es un problema a abordar en este tipo de obra de contención.

Los elementos de cimentación de las obras de gravedad, ya sean zapatas corridas superficiales o encepados que recogen los pilotes de una posible cimentación profunda, son partes esenciales de la estructura cuya capacidad debe verificarse.

Cada obra en concreto puede presentar formas de fallo particulares cuyo estudio detallado se sale del alcance de esta ROM.

Mención expresa debe hacerse de las obras de recintos tablestacados, que presentan modos de fallo específicos de rotura por corte interior o por vuelco o roturas estructurales por tracción en uniones de carácter local.

Otros modos de fallo que pueden ocurrir en estructuras de contención de empujes de tierras son, sin pretender una relación exhaustiva, los siguientes:

- ◆ Excavaciones o socavaciones en su zona de intradós.
- ◆ Erosiones causadas por filtraciones a través o en el entorno de la obra y/o caudales de filtración excesivos en obras en las que se pretenda cierta estanqueidad.
- ◆ Variaciones del régimen de agua en el entorno, inducidas por la obra de contención y que puedan provocar ascensos o descensos del nivel freático no deseados, que puedan dañar estructuras u otras obras próximas.
- ◆ Modificación del régimen erosivo local que afecte al entorno o a la propia obra en zonas costeras.
- ◆ Movimientos inducidos por anclajes que transmitan la carga próxima a cimientos de otras estructuras.
- ◆ Posibles efectos nocivos de las vibraciones durante la hincada de tablestacas o durante la compactación de rellenos.

Por otro lado, las consideraciones relativas a cimentaciones superficiales y profundas, según el caso, que se mencionan en los apartados 3.5.3 y 3.6.3 deben tenerse en cuenta al proyectar estructuras de contención.

Todos estos modos de fallo deben ser analizados debidamente siguiendo los procedimientos generales que se indican en esta ROM. En los apartados siguientes se incluyen algunas recomendaciones complementarias, únicamente para tres problemas específicos, que son el vuelco de los muros de gravedad, la rotura del terreno en los muros pantalla y el levantamiento de fondo de las excavaciones entibadas. Los otros modos de fallo deben analizarse por los procedimientos generales ya indicados.

3.7.11.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS SITUACIONES DE PROYECTO

Para el estudio de los Estados Límite Últimos de las estructuras de contención deben considerarse unas situaciones de proyecto que representen con la mayor fidelidad posible la realidad de la obra. A continuación se dan algunas recomendaciones al respecto.

a. Definición de los parámetros geométricos

Los parámetros geométricos de las obras de contención deben quedar claramente definidos en cada situación a analizar y deben ser comunes a todos los análisis de tipo geotécnico. Aunque se puedan hacer estudios de sensibilidad a la variación de ciertos parámetros geométricos, siempre se mantendrá una geometría básica común.

La representación de los contactos entre distintos terrenos bajo la cimentación de la obra, y en general del subsuelo, se hará atendiendo a lo recomendado en 3.3.5.1, 3.5.3.1 y 3.6.3.1, según corresponda.

En general, es de especial interés en obras de contención la definición precisa de los niveles de tierra en el trasdós y, con carácter de máxima importancia, los niveles freáticos en el entorno de la obra y su posible oscilación, de acuerdo con lo definido en 3.3.5.1 y 3.4.4.1.

Deben tenerse presentes posibles socavaciones o excavaciones en las zonas de intradós, donde las estructuras de contención de tipo pantalla se apoyan para soportar las cargas de su trasdós.

b. Definición de las propiedades del terreno

Las propiedades del terreno que más interesan a la hora de proyectar una estructura de contención son:

- ◆ Las características geotécnicas del cimiento, según se especifica en 3.5.3.2 y 3.6.3.2 para las cimentaciones superficiales y profundas, respectivamente.
- ◆ Las características geotécnicas del material de trasdós, que en muchas ocasiones estará formado por rellenos artificiales. Los datos que se requieren más comúnmente son los relativos a sus pesos específicos y a su resistencia al corte.

Para definir las propiedades del terreno de trasdós se deben adoptar los valores representativos de los parámetros correspondientes sin adoptar coeficientes reductores ni mayorantes, tal como se explica en los apartados 3.3.5.2 y 3.3.7.

El ángulo de rozamiento del terreno del trasdós a utilizar en los cálculos será, en general, el ángulo de rozamiento residual, el correspondiente a grandes deformaciones. Así se tendrá en cuenta el posible efecto desfavorable de la rotura progresiva. En situaciones especiales se puede justificar la adopción de otro criterio.

c. Definición de las acciones

En los cálculos geotécnicos necesarios para verificar la seguridad frente a los estados límite, el empuje del terreno puede ser considerado como una acción (dato de entrada en el problema en estudio) o como una reacción a calcular dependiendo el modo de fallo que se analice.

Las tensiones en los anclajes y las compresiones en los puntales de entibaciones pueden ser también consideradas como acciones en unos cálculos (cálculo de la longitud de anclaje, dimensionamiento estructural de un puntal) o consideradas como parte de la solución, esto es, reacciones a calcular como respuesta a las acciones, en otros problemas.

De acuerdo con lo indicado en el apartado 3.3.5.3, los empujes del terreno se considerarán como acciones de carácter permanente independientemente del modo de fallo a verificar, incluyéndose, por tanto, en las ecuaciones de verificación de los modos de fallo geotécnicos (GEO) o debidos al exceso de presión de agua (UPL), con sus valores representativos sin mayorar, es decir con sus valores característicos. No obstante lo anterior, los empujes adicionales debidos a las sobrecargas tendrán la consideración de acciones variables. Para la verificación de modos de fallo estructurales (STR), los empujes del terreno podrán tener otra consideración.

3.7.11.1.2 VERIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD FRENTE AL VUELCO EN LOS MUROS DE GRAVEDAD

La acción predominante en los muros de gravedad es el empuje de las tierras y contra esa acción ha de proyectarse el muro de manera que satisfaga todos los requisitos de seguridad frente a los modos de fallo que se indican en el apartado 3.7.11.1, así como frente a otros posibles que el ingeniero pueda imaginar.

El procedimiento de análisis adecuado dependerá del modo de fallo que se analice. En esta ROM se dan criterios para analizar fallos debidos a falta de estabilidad global (apartado 3.8), fallos por deslizamiento, vuelco o hundimiento cuando la cimentación del muro es superficial (apartado 3.5) y fallos debidos a hundimiento o rotura horizontal cuando la cimentación es pilotada (apartado 3.6).

A lo largo de la ROM se indican, además, criterios para analizar otros modos de fallo tales como socavaciones, erosiones, sifonamientos, etc.

En este apartado se quieren añadir algunos detalles al procedimiento de análisis específico del vuelco plástico de muros de gravedad cimentados superficialmente. Este modo de fallo también está considerado, aunque de una forma más genérica, al hablar de cimentaciones superficiales en el apartado 3.5.6.

En la Fig. 3.7.34 se representan esquemáticamente las fuerzas involucradas en el equilibrio del muro y se indica una manera recomendable de clasificarlas como estabilizadoras o volcadoras.

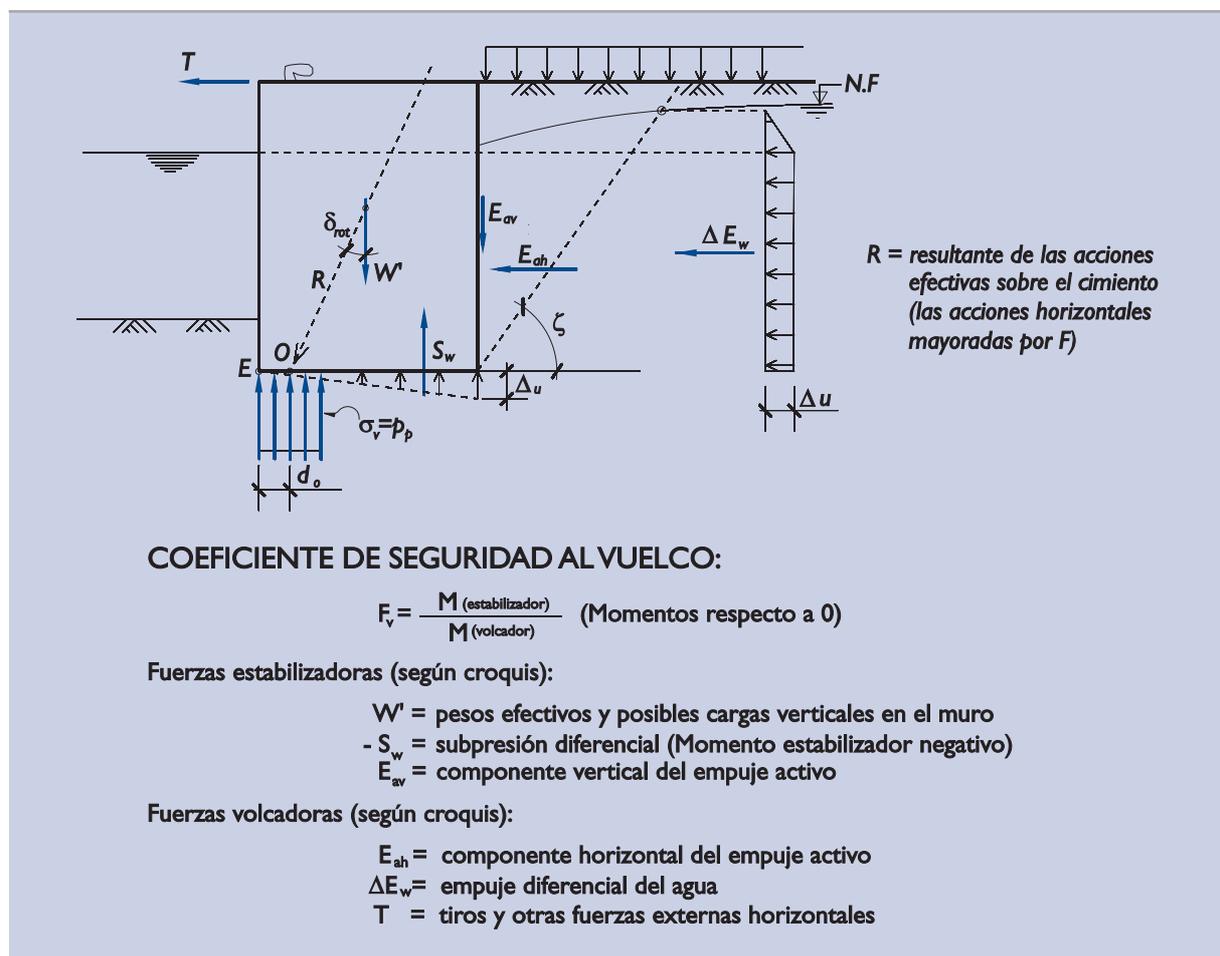
Para que se produzca el vuelco plástico es preciso que las fuerzas volcadoras crezcan mientras que las fuerzas estabilizadoras permanecen constantes. Se ha convenido en definir como coeficiente de seguridad al vuelco plástico el número F por el que han de multiplicarse todas las fuerzas volcadoras, conservando su línea de acción, para que se alcancen la condición de rotura en el terreno de apoyo.

En el estado límite de vuelco el muro se apoyaría sobre una franja estrecha, centrada en O , y se produciría la plastificación del terreno en la zona próxima al pie del muro. La presión de plastificación se denomina aquí p_p .

En ese instante de rotura, con el efecto de las fuerzas volcadoras multiplicado por F , el equilibrio de momentos respecto al punto O conduce a la ecuación:

$$F \cdot M_{\text{volcador}} = M_{\text{estabilizador}} \quad (\text{momentos respecto a } O)$$

Figura 3.7.34. Comprobación de seguridad frente al vuelco



La ubicación del punto O , sin embargo, depende de F ; y en consecuencia no se puede calcular F más que mediante un proceso iterativo en el que se deberá tomar como variable para hacerla crecer de manera paulatina.

El procedimiento de cálculo puede desarrollarse mediante los siguientes pasos:

- a. Ordenación y clasificación de los valores de las acciones, obteniendo los datos que se indican en la Fig. 3.7.34 para cada componente de las acciones.

- b. Tomar momentos de estas acciones respecto al punto E del borde externo del área de apoyo para definir los valores de los momentos estabilizador M_1 y volcador M_2 . Adviértase que si el terreno fuese infinitamente resistente el cociente de esos dos momentos sería precisamente el coeficiente de seguridad buscado. El coeficiente de seguridad al vuelco plástico será siempre inferior a ese cociente:

$$F < \frac{M_1}{M_2}$$

M_1 = momento estabilizador respecto al punto E.

M_2 = momento volcador respecto al punto E.

- c. Supóngase, para iniciar el proceso iterativo, un valor razonable de F.
- d. Calcúlese el punto de paso de la resultante que corresponde a ese valor de F. Ese punto de paso puede definirse mediante la distancia d_o al borde de la cimentación, que queda definida por la ecuación:

$$d_o = \frac{M_1 - F \cdot M_2}{V'}$$

siendo V' la componente vertical de la resultante de las acciones. Para el caso de la Fig. 3.7.34, se tiene:

$$V' = W' + E_{av} - S_w$$

- e. Calcúlese la inclinación de las acciones correspondientes al valor de F supuesto. Para el caso de la Fig. 3.7.34 se tendría:

$$\operatorname{tg} \delta_{\text{rot}} = F \cdot \frac{E_{ah} + \Delta E_w + T}{W' + E_{av} - S_w}$$

- f. Calcúlese la componente vertical de la presión de rotura del terreno que corresponde al ancho de cimentación $B^* = 2 d_o$ y el valor de δ_{rot} obtenido en el epígrafe precedente. Ese valor se denominará p_p .

En el apartado 3.5.6.2 se indican procedimientos de cálculo que relacionan la presión vertical que produce el hundimiento o plastificación del terreno (p_p) con el ancho efectivo de cimentación ($B^* = 2 d_o$) y con la inclinación de la acción que causa la plastificación del terreno (ángulo δ_{rot}).

El procedimiento de cálculo de la presión de hundimiento (p_p) debe ser el adecuado, dependiendo de la naturaleza del terreno y la importancia de la obra. Ver 3.5.4.1.

- g. Calcúlese la componente vertical de la presión que transmite el muro al terreno para el coeficiente de seguridad que se ha supuesto. Esa presión es:

$$p = \frac{V'}{2d_o}$$

- h. Compárese p y p_p y procédase como se indica:

Si $p > p_p$, hacer otra iteración con un valor menor de F.

Si $p < p_p$, aumentar el valor de F y repetir el proceso.

El reinicio del proceso con el nuevo valor de F debe comenzarse en el punto d) de la relación de los pasos de cálculo.

El cálculo debe darse por bueno cuando el valor de F queda suficientemente acotado. Con error máximo del orden del 1%, a modo de ejemplo.

Conviene que el coeficiente de seguridad al vuelco plástico definido de esta manera sea superior a los indicados en 3.5.6 para obras con ISA bajo (5 a 19).

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.5.8 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

3.7.11.1.3 VERIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD FRENTE A LA ROTURA DEL TERRENO EN MUROS PANTALLA

Los muros pantalla pueden provocar el estado activo (rotura del terreno) en el trasdós y simultáneamente el estado pasivo en su zona de empotramiento cuando experimentan las grandes deformaciones asociadas a los Estados Límite Últimos de rotura.

Los modos de rotura de los muros pantalla son muy variados e involucran, en la mayoría de los casos, la rotura estructural de la propia pantalla o de sus anclajes. En otra parte del Programa ROM que se dedique al estudio específico de estas estructuras, se darán recomendaciones sobre los procedimientos de análisis aplicables a estos casos. En el apartado 4.3 se hacen algunas consideraciones adicionales al hablar de muelles de pantallas.

En este apartado se quieren mencionar únicamente los modos de fallo controlados exclusivamente por la resistencia del terreno.

El equilibrio global de la obra, rompiendo por el terreno de su entorno, debe analizarse tanteando posibles líneas de rotura y analizando su estabilidad según se indica en el apartado 3.8.

El sifonamiento del pie de la pantalla, debido a posibles filtraciones ascendentes por el lado del intradós, está considerado en el apartado 3.4.6.

El problema de las erosiones internas está también considerado en los apartados 3.4.8, 4.3 y 4.4.

El equilibrio vertical de la pantalla se puede estudiar siguiendo la filosofía que se indica en el apartado 4.4.5.

Otros posibles Estados Límite Últimos que el ingeniero pueda imaginar deberán ser analizados siguiendo los criterios generales que se indican a lo largo de estas Recomendaciones.

Profundidad de empotramiento mínima

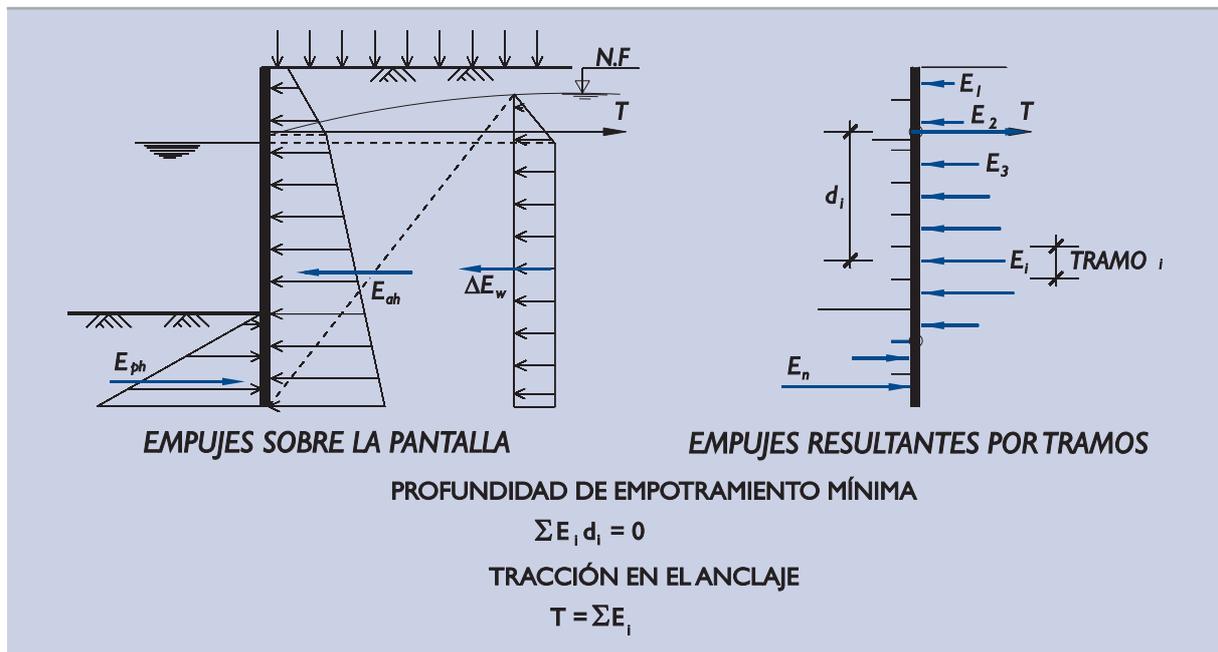
Existe un Estado Límite Último general y sencillo que es común a todas las pantallas ancladas y que conviene analizar siempre, independientemente de otros análisis complementarios que puedan realizarse con otros fines. Ese Estado Límite Último es el que se trata de representar en la Fig. 3.7.35.

En ese Estado Límite Último se supone que la pantalla se ha desplazado suficientemente, de manera que en su trasdós existe un estado de empuje activo y en el empotramiento existe un estado de empuje pasivo.

Las causas que motivarían el que se alcance esa situación límite pueden ser muy variadas. Puede ser que el terreno tenga menor resistencia que la esperada, puede ser que las sobrecargas sean mayores que las esperadas, etc. En lo que sigue se podrá tener en mente que la causa que provoca el estado límite es un defecto en la longitud de empotramiento.

Supuesta la movilización de los empujes extremos, será posible calcular los diagramas de empujes unitarios en ambas caras de la pantalla siguiendo las recomendaciones de los apartados precedentes.

Figura 3.7.35. Análisis simplificado de una pantalla anclada



Será posible también calcular los empujes resultantes por tramos para obtener los valores E_1, E_2, \dots que se indican en la Fig. 3.7.35.

Tomando momentos respecto al punto de anclaje se puede ir añadiendo nuevos términos, de arriba a abajo, al sumatorio $\Sigma E_i d_i$. En el momento en que ese sumatorio se anule por segunda vez (después de haber entrado en la zona de empotramiento de la pantalla) se habrá alcanzado una profundidad de empotramiento mínima.

Si la pantalla estuviera empotrada una longitud menor no sería posible el equilibrio. Si tuviera un empotramiento mayor habría cierta seguridad de que el Estado Límite Último que se está planteando no puede ocurrir.

Una medida de la seguridad frente a este Estado Límite Último puede ser la relación entre las longitudes de empotramiento real y la longitud de empotramiento necesaria. Esas longitudes pueden medirse o bien desde el nivel del terreno en el lado de intradós o bien contabilizarlas a partir de un punto más bajo (el punto donde los empujes activos se igualan con los pasivos, por ejemplo).

Se considera aceptable en esta ROM que, en obras de ISA bajo, para la verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en muros pantalla, la longitud de empotramiento real sea 1,3 veces mayor que la longitud de empotramiento mínima necesaria para la combinación cuasi-permanente de acciones, 1,25 veces para las combinaciones fundamentales y 1,2 para las combinaciones accidentales o sísmicas. Todas las longitudes deben medirse desde el nivel de tierras en el intradós. La consideración de otros Estados Límite Últimos puede conducir a mayores profundidades de empotramiento.

Tensión en el anclaje

El estudio de este Estado Límite Último proporciona, además, cierta información útil respecto a otros aspectos del comportamiento de la pantalla. Tal como se indica en la Fig. 3.7.35, si la pantalla tuviera precisamente la longitud de empotramiento mínima, la tensión en el anclaje sería precisamente igual a la suma algebraica de todos los empujes. Un mayor empotramiento conduce, en general, a valores de T menores, de manera que el valor así determinado es una primera idea de la capacidad de anclaje necesaria para soportar la pantalla.

Caso de varios niveles de anclaje

En aquellos casos en que las pantallas se anclan a distintos niveles (construcciones en tierra) se puede seguir un procedimiento similar para estudiar el Estado Límite Último antes descrito. Para ello es necesario suponer que en el lado de intradós existen tierras que se van excavando y que los anclajes se van colocando a medida que se excavan las tierras.

Supuesto el momento en que el primer anclaje está ya colocado y se va a proceder a colocar el segundo nivel, se puede plantear el estado límite antes mencionado y obtener la tensión en el anclaje superior.

Esa tensión será, en adelante, considerada como una fuerza constante. Esta hipótesis permite calcular la fuerza en el segundo nivel de anclaje planteando el equilibrio límite justo antes de colocar el tercero.

El final del proceso conduce a una serie de fuerzas de anclaje y a una profundidad de empotramiento mínimas que pueden usarse en la verificación de la seguridad de la pantalla como ya se ha indicado.

Pantallas en voladizo

El análisis del Estado Límite Último que se viene considerando puede hacerse de manera semejante. En estos casos, al no haber anclajes, debe tomarse momentos respecto al punto más bajo de la pantalla. Esto equivale a suponer que existe un anclaje virtual en el punto más bajo de la pantalla.

El cálculo se realizará como en el caso anterior, bajando progresivamente ese punto más bajo de la pantalla hasta satisfacer la ecuación de equilibrio de momentos alrededor de él. En ese momento se ha alcanzado la profundidad de empotramiento mínima necesaria para garantizar el equilibrio.

La suma de todos los empujes resultará, en ese caso, dirigida hacia el trasdós y significaría una compresión en el anclaje virtual supuesto en el pie de la pantalla. A esa reacción se le suele denominar contraempuje.

Para movilizar el contraempuje es necesaria una cierta longitud adicional de empotramiento. Esa longitud se puede estimar suponiendo que en la zona de contraempuje actúa una presión similar al empuje pasivo correspondiente a la presión vertical de tierras del trasdós. Esto es:

$$\Delta = \frac{\sum E_i}{K_{ph} \sigma_v^i}$$

- Δ = longitud adicional de hincas para movilizar el contraempuje.
- K_{ph} = coeficiente de empuje pasivo en la zona de empotramiento.
- σ_v^i = presión vertical efectiva a la profundidad del contraempuje en el lado del trasdós.

Las pantallas en voladizo en obras de ISA bajo deben empotrarse también en el terreno una profundidad al menos de 1,25 veces mayor que la mínima necesaria para la combinación cuasi-permanente de acciones, 1,2 veces para las combinaciones fundamentales y 1,15 veces para las combinaciones accidentales o sísmicas, con el objeto de evitar este modo de fallo (incluyendo la longitud necesaria para movilizar el contraempuje).

Otros motivos pueden requerir que el ingeniero decida mayores empotramientos. En general, se advierte que las pantallas en voladizo pueden experimentar deformaciones muy elevadas, no sólo por la deformación del propio terreno sino también debidas a las de la propia estructura de la pantalla. Esas deformaciones suelen ser limitativas o críticas en un determinado proyecto. Por ese motivo deben ser objeto de un cálculo detallado y,

además, considerarse la posible heterogeneidad de los movimientos a la hora de aceptar como buenos los resultados obtenidos.

3.7.11.1.4 VERIFICACIÓN DE LA SEGURIDAD FRENTE AL LEVANTAMIENTO DEL FONDO DE ENTIBACIONES

Las excavaciones entibadas realizadas en suelos blandos pueden fallar por levantamiento en su fondo. La presión vertical sobre un plano horizontal al nivel del fondo es distinta a uno y otro lado de la excavación y esa diferencia de presión puede producir la plastificación del terreno en el fondo de la excavación y su levantamiento según un mecanismo similar al que se indica en la Fig. 3.7.36.

Ese mecanismo, u otros similares, son típicos en suelos blandos saturados poco permeables y en situaciones de corto plazo, por ese motivo en la figura mencionada se representa la resistencia al corte mediante el parámetro “ s_u ”.

En suelos granulares o en suelos cohesivos a largo plazo, es decir, en aquellos casos en los que se puede contar con un ángulo de rozamiento apreciable, este tipo de rotura no suele producirse y, por lo tanto, esta comprobación no es necesaria.

La fórmula que se indica es aplicable a excavaciones en zanja de longitud indefinida. Si esa longitud es relativamente corta, su efecto se puede tener en cuenta reduciendo la anchura real a otra equivalente dada por la expresión:

$$B_{(\text{equivalente})} = B \cdot \frac{L}{L + 2B}$$

y realizar después la comprobación con esa anchura virtual más pequeña que la real.

Para el caso de un terreno homogéneo y con sobrecargas en superficie, el coeficiente de seguridad contra este tipo de rotura se indica en Fig. 3.7.36.

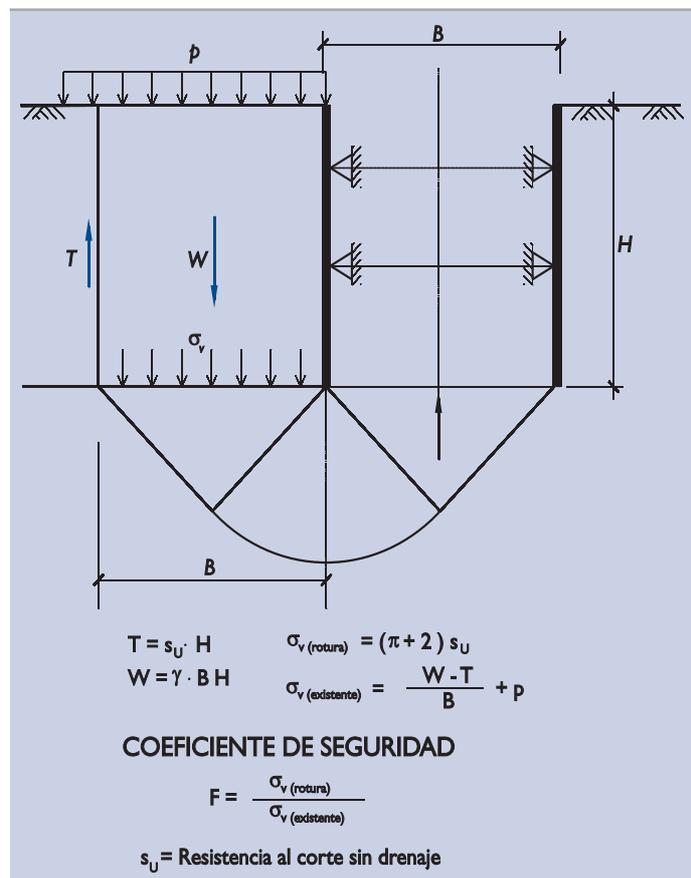
Los coeficientes de seguridad frente a este modo de fallo deben ser superiores a los mínimos que se indican en la Tabla 3.4.2. para obras de ISA bajo (5 a 19). Cuando la rotura por levantamiento de fondo pueda implicar la posibilidad de pérdida de vidas humanas, el ingeniero deberá realizar excavaciones entibadas con coeficientes de seguridad mayores de acuerdo con lo previsto en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10 de esta ROM.

3.7.11.2 Estados Límite de Servicio

3.7.11.2.1 MOVIMIENTO DE LOS MUROS DE GRAVEDAD

En general los movimientos en las zonas próximas a las estructuras de contención son importantes y, por lo tanto, la verificación de que su ocurrencia no perjudica a estructuras próximas es, siempre, una verificación indispensable.

Figura 3.7.36. Levantamiento del fondo en excavaciones entibadas



Los movimientos de las estructuras de contención de tipo gravedad pueden estimarse suponiéndolos de tipo rígido y controlados únicamente por la deformación del cimiento.

Los movimientos del cimiento, a estos efectos, pueden calcularse mediante los procedimientos indicados en los apartados 3.5 y 3.6 para cimentaciones superficiales y profundas, respectivamente.

Las acciones a considerar en estos cálculos serán las que correspondan a las situaciones de servicio que el ingeniero deba comprobar. Normalmente el empuje de tierras será considerado como una de las acciones y habrá sido evaluado en la condición extrema de empuje activo. Esos cálculos de empuje activo habrán sido necesarios para comprobar los distintos Estados Límite Últimos descritos en los apartados precedentes.

El movimiento que resulta de estos cálculos debe compararse con el movimiento necesario para que se movilice el empuje activo. A estos efectos pueden utilizarse los valores orientativos de movimientos que se indican en 3.7.2.

Si el movimiento calculado es mayor que el necesario para que se movilice el empuje activo, el cálculo se considerará correcto; la situación resultante es compatible. De otro modo habría que suponer un valor del empuje mayor que el valor correspondiente a la situación extrema de empuje activo (empuje mínimo).

Si el movimiento resulta menor que el necesario para movilizar el empuje activo, el ingeniero debe modificar sus cálculos para tener en cuenta que, en la situación de servicio considerada, el empuje sobre la estructura de contención puede ser mayor que el empuje activo.

Se considera admisible, en esos casos, realizar el cálculo de movimientos con unos empujes sobre la estructura de contención calculados en la condición teórica de empuje al reposo.

En cualquier caso, dada la imprecisión de los métodos de cálculo de deformaciones, la verificación de las condiciones de servicio no se considerará satisfactoria más que si los movimientos estimados son únicamente una fracción (del orden de 1/3) de los que conducen a la estructura fuera del límite correspondiente.

3.7.11.2 MOVIMIENTO DE LOS MUROS PANTALLA

Los muros pantalla contienen el empuje de tierras apoyándose en la parte enterrada, movilizándolo parcialmente el empuje pasivo y con la ayuda de anclajes u otros elementos de soporte.

El cálculo de los movimientos, de los empujes del terreno y de las cargas en los elementos de soporte, en condiciones próximas a las de servicio, es un problema complejo de interacción suelo-estructura que debe resolverse con procedimientos adecuados.

Todos los problemas de interacción suelo-estructura pueden resolverse, al menos en primera aproximación, representando la estructura mediante elementos viga, debidamente conectados, y el terreno mediante muelles que tengan una respuesta carga-deformación similar a la esperada en el terreno.

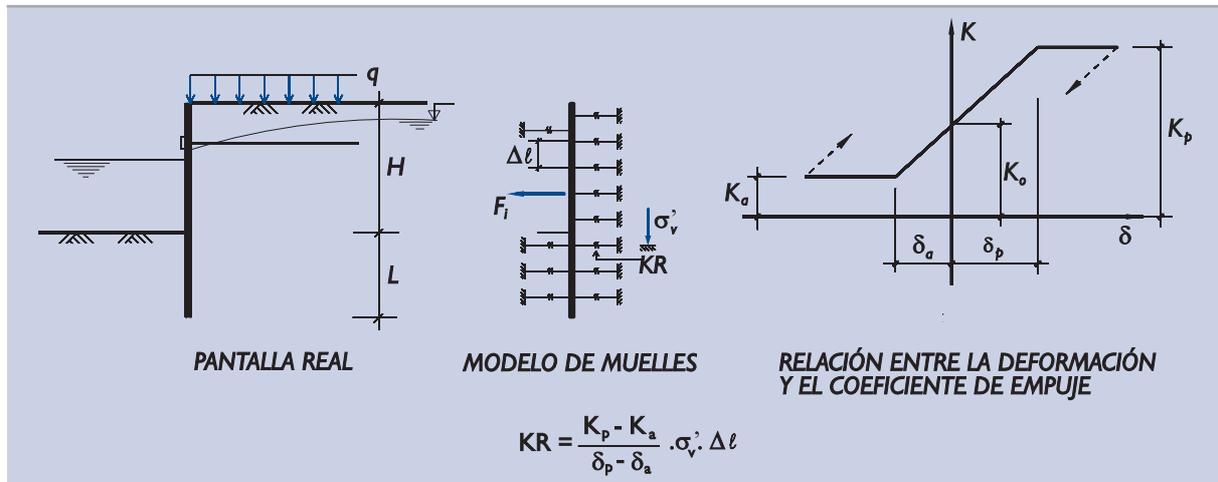
Por otro lado, en estos problemas de interacción tan marcada y de tipo no lineal, el proceso constructivo tiene también cierta importancia. Los esfuerzos en las pantallas y en sus elementos de soporte no dependen, únicamente, de la geometría final de la obra, sino también del orden de los trabajos. Por ese motivo, el cálculo de empujes debe realizarse por pasos simulando las diversas fases constructivas.

El modelo estructural puede ser como el indicado en la Fig. 3.7.37.

Las fases elementales del proceso de cálculo pueden consistir, entre otras, en:

- ◆ Excavación en el lado de intradós.
- ◆ Relleno en el lado de trasdós.

Figura 3.7.37. Esquema de cálculo de pantallas mediante resortes equivalentes



- ◆ Variación del nivel freático.
- ◆ Colocación o retirada de anclajes.
- ◆ Tesado de anclajes.
- ◆ Colocación o retirada de sobrecargas.

Cada una de esas operaciones elementales debe simularse adecuadamente en el cálculo.

a. Excavación y relleno

La excavación del lado del intradós, por ejemplo, puede simularse mediante las siguientes operaciones de cálculo:

- ◆ Eliminación de los muelles que representan la zona excavada. Conviene, en estos cálculos, simular la excavación en pasos pequeños de manera que en cada paso no se elimine más de un muelle.
- ◆ Cálculo de las cargas descompensadas, que serán para cada muelle del lado de intradós:

$$\Delta F = \frac{\Delta \sigma'_v}{\sigma'_v} \cdot F$$

donde:

- $\Delta \sigma'_v$ = variación de la tensión efectiva vertical debida a la excavación.
- σ'_v = tensión efectiva vertical previa.
- ΔF = carga descompensada a introducir en el cálculo.
- F = carga previa en el muelle.

Para los muelles eliminados esta regla conduce, evidentemente, a:

$$\Delta F = F$$

Introduciendo esas cargas como tiros en los nudos se puede obtener el estado de deformaciones, empujes y esfuerzos al final de la etapa que se simula.

- ◆ Actualización de las constantes de resorte.

El nuevo estado de tensiones verticales efectivas hace que las constantes de resorte cambien según se indica en la figura que se comenta. En cada etapa de cálculo se irán actualizando sus valores. Las operaciones de relleno en el trasdós se podrían simular con pasos análogos.

b. Variación del nivel freático

Los empujes del agua deben considerarse siempre como fuerzas externas adicionales. Normalmente el cálculo comenzará con presiones hidrostáticas equilibradas que suponen una fuerza neta nula sobre la pantalla. El cambio del nivel freático, en cualquiera de los lados de la pantalla, será representado como una serie de fuerzas horizontales externas en cada nudo situado bajo el nivel freático original. La suma de todas esas fuerzas representará el empuje neto desequilibrado causado por el rebajamiento del nivel freático.

El cambio del nivel freático hace que cambien las presiones efectivas verticales y que, por lo tanto, cambien las constantes de resorte. Éstas deben actualizarse como se ha indicado antes.

c. Anclajes

La colocación de anclajes puede simularse, sencillamente, añadiendo un muelle cuya constante de resorte debe coincidir con la que se estime para el anclaje.

El tesado de un anclaje puede simularse aplicando, en el nudo correspondiente, una fuerza igual que la del anclaje. Conviene considerar esta operación en varias etapas de cálculo para facilitar la simulación del comportamiento no lineal.

La retirada de un anclaje se puede representar quitando el muelle que lo representa e introduciendo en el nudo correspondiente la carga que tenía el anclaje aplicada en sentido opuesto. Conviene hacer esta simulación en varios intervalos pequeños.

d. Sobrecargas

El efecto de sobrecargas uniformes en superficie, q , puede simularse de la misma forma, suponiendo un incremento de presión vertical:

$$\Delta \sigma'_v = q$$

en el lado afectado por la sobrecarga.

El empuje sobre la pantalla quedará representado por una fuerza horizontal en cada nudo:

$$F = q \cdot K_{oq} \cdot \Delta l$$

siendo K_{oq} el coeficiente de empuje al reposo correspondiente a las sobrecargas, calculado como se indica en 3.7.8.

Conviene, además, para sobrecargas importantes, simular su efecto en distintas etapas. Para cada etapa de cálculo, además, las constantes de muelle deben ir actualizándose con las nuevas presiones verticales efectivas.

e. Proceso no lineal

Cuando, durante la simulación del proceso constructivo, se alcanza en algún muelle la deformación límite, el muelle correspondiente debe simularse con $KR = 0$ para el siguiente estado de carga. Cuando la deformación vuelva a cambiar de signo (así puede ocurrir en las fases de tesado de anclajes), se debe restituir su rigidez; de esa forma se pueden simular la histéresis insinuada en la Fig. 3.7.37.

f. Constantes de resorte

El problema principal, en los modelos de este tipo, es la determinación de los coeficientes de empuje y las deformaciones límite necesarias para alcanzarlos. Los primeros pueden obtenerse de las solu-

ciones analíticas indicadas en este apartado 3.7. Las segundas suelen estimarse en función de la experiencia.

A falta de otros datos, se puede estimar que:

$$|\delta_p| - |\delta_a| = 2 \text{ a } 5\% \text{ de } H \quad (\text{diferencia de los valores absolutos de } \delta_p \text{ y } \delta_a)$$

según el terreno sea más o menos denso.

Dada la imprecisión que normalmente existirá en la determinación de los parámetros de deformabilidad, se deben hacer estudios de sensibilidad frente a la variación de deformabilidad.

Con este tipo de modelos se obtienen no sólo los movimientos de la pantalla, sino también las leyes de esfuerzos. Estas leyes pueden servir de ayuda en el proyecto estructural.

El proyecto estructural de las pantallas y de sus anclajes requerirá la consideración de procedimientos no contemplados en esta ROM dedicada, únicamente, a aspectos geotécnicos. Las ideas apuntadas pueden ayudar al ingeniero en esos otros análisis.

3.8 ESTABILIDAD DE TALUDES

3.8.1 Introducción

En esta parte de la ROM 0.5 se recogen los principios generales del análisis y algunos detalles de los tipos de cálculo más usuales asociados al estudio de la estabilidad global del terreno.

La inestabilidad del terreno se manifiesta mediante grandes desplazamientos que implican la ruina total o parcial de la obra. Algunos tipos de inestabilidad ya han sido considerados en otras partes de esta ROM; entre ellos cabe citar:

- ◆ El hundimiento o el deslizamiento de las cimentaciones superficiales.
- ◆ El hundimiento o la rotura del terreno debido a fuerzas horizontales en cimentaciones profundas.
- ◆ El hundimiento o el deslizamiento de muros de contención.

Existen, además, otros posibles mecanismos de rotura general del terreno a lo largo de superficies de forma diversa, según sea la geometría de sus zonas más débiles. Estos mecanismos de rotura y la metodología recomendable para su análisis son los que se consideran a continuación, bajo el nombre genérico de “estabilidad de taludes”, ya que, aparte de los tres casos mencionados (cimentaciones superficiales, cimentaciones profundas y muros), las inestabilidades globales suelen ocurrir en aquellos casos en los que existe un desnivel importante en el terreno, ya sea natural o artificialmente creado mediante excavación (taludes en desmonte), mediante relleno (taludes en terraplén) o mediante procedimientos mixtos.

Los taludes pueden ser, simplemente, obras de tierra o roca donde no existan elementos estructurales, pero pueden consistir, también, en estructuras mixtas formadas por el propio terreno y elementos estructurales anejos. Como ejemplo de estos últimos pueden citarse las cimentaciones superficiales o profundas en taludes o en zonas próximas a los taludes. Son considerados dentro de este caso también los elementos de contención que usualmente se emplean para asegurar la estabilidad del conjunto, tales como muros de contención de gravedad o de pantalla flexible, en voladizo o ancladas, bulones para contención de cuñas en roca, etc.

En todos estos casos en los que existe un desnivel del terreno, sea con o sin estructuras asociadas, será preciso considerar los estados límite que se mencionan a continuación y utilizar para su análisis los principios generales que se indican para cada caso. Los métodos de cálculo que se sugieren son de aplicación a los casos concretos que se mencionan al hacer la descripción de cada método.

3.8.2 Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite Últimos

3.8.2.1 Pérdida de la estabilidad global

La estabilidad global de una determinada obra se pierde cuando la tensión de corte necesaria para mantenerla es superior a la resistencia al corte del terreno y eso ocurre, además, en una superficie de rotura, que divide a la obra en dos partes: la parte englobada entre la superficie externa y la superficie de rotura deslizaría sobre el resto.

Ese deslizamiento puede ser brusco (movimiento de varios metros en pocos minutos) o lento o de fluencia. Que ocurra de una u otra manera depende, principalmente, de las características del terreno.

La pérdida de estabilidad global de las obras de tierra (taludes en rellenos o en desmontes) y, sobre todo, de las obras mixtas de tierras y estructuras anejas o próximas es un accidente grave que implica la ruina completa de la parte de la obra movida. El estudio de este Estado Límite Último, y la demostración explícita de que el nivel de seguridad alcanzado cumple los requisitos mínimos indicados en el apartado 3.8.6, es una tarea imprescindible del proyecto.

La Fig. 3.8.1 incluye algunos esquemas de modos de fallo asociados a la estabilidad de taludes que son considerados en esta parte de la ROM.

3.8.2.2 Deformaciones

Las deformaciones del terreno en las zonas próximas a los desniveles o taludes pueden ser importantes y pueden dar lugar al Estado Límite Último de estructuras situadas en su proximidad, antes de alcanzarse el Estado Límite Último de pérdida de estabilidad global, estando el talud aún en buenas condiciones de servicio.

El estudio de esas deformaciones o la ubicación de las estructuras que sean sensibles a ellas, fuera de la zona de influencia de los taludes, es un aspecto a considerar en el proyecto. Para analizar este problema de deformaciones deben seguirse los criterios básicos expuestos en el apartado 3.8.7.

3.8.2.3 Erosiones

El movimiento del agua puede provocar la ruina de los taludes y de las estructuras que dependen de ellos, bien mediante erosión externa degradando su geometría, bien mediante erosión interna arrastrando materiales y provocando asentamientos o hundimientos locales.

Ambos procesos pueden ser considerados como causantes de un Estado Límite Último de colapso progresivo, ya que pueden provocar la pérdida de equilibrio del propio talud o de estructuras próximas.

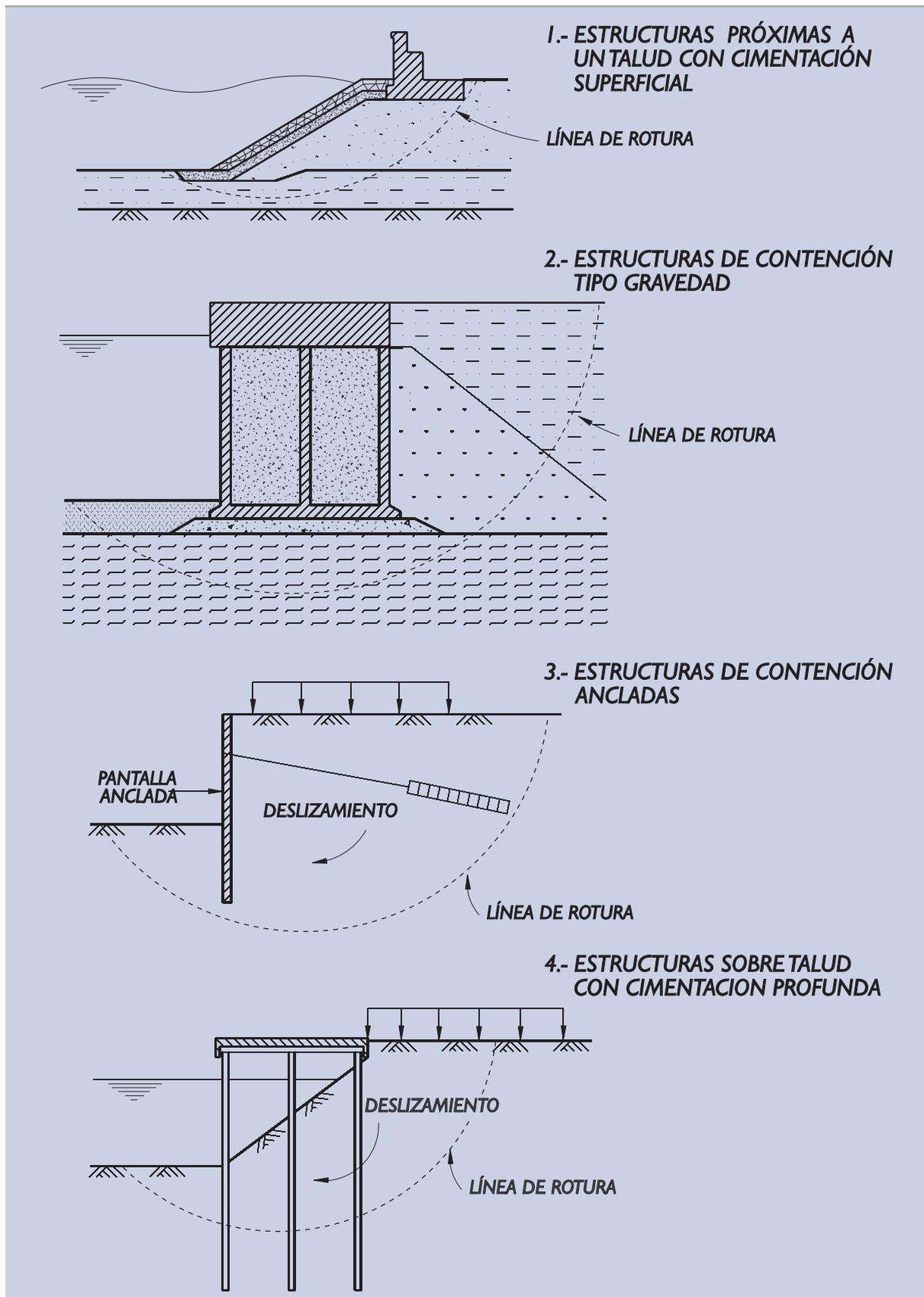
Los procesos de erosión deben analizarse según los principios generales expuestos en el apartado 3.4 de esta ROM y, en caso de ser necesario, se deberán tomar las medidas preventivas adecuadas.

3.8.3 Modos de fallo más usuales de los taludes asociados a Estados Límite de Servicio

Tanto los movimientos como las erosiones, cuando son de amplitud moderada, pueden ser compatibles con los requisitos de servicio de la obra.

Los límites de movimientos admisibles habrán de fijarse en las bases del proyecto de cada caso particular. En el apartado 3.8.7 se indican los principios generales del cálculo de deformaciones que pueden aplicarse para estimar los movimientos en torno a los taludes, a los efectos de estas comprobaciones.

Figura 3.8.1. Esquema de algunos modos de fallo por pérdida de la estabilidad global



Los límites admisibles en cuanto a deterioros causados por las erosiones, que habrán de establecerse en los criterios de proyecto, deben garantizarse mediante medidas preventivas que, en general, no son susceptibles de análisis cuantitativo.

3.8.4 El cálculo de la estabilidad global en suelos

3.8.4.1 Tipos de deslizamiento

La observación de las formas de las superficies de rotura, en aquellos casos en los que se ha alcanzado el estado límite de la pérdida de estabilidad global en suelos, ha guiado el desarrollo de las distintas técnicas de análisis cuantitativo.

Los tipos de superficie de deslizamiento más frecuente pueden asimilarse, a efectos de cálculo, a uno de los tres tipos siguientes (ver Fig. 3.8.2):

a. Deslizamientos según líneas de rotura planas paralelas a la superficie exterior del terreno

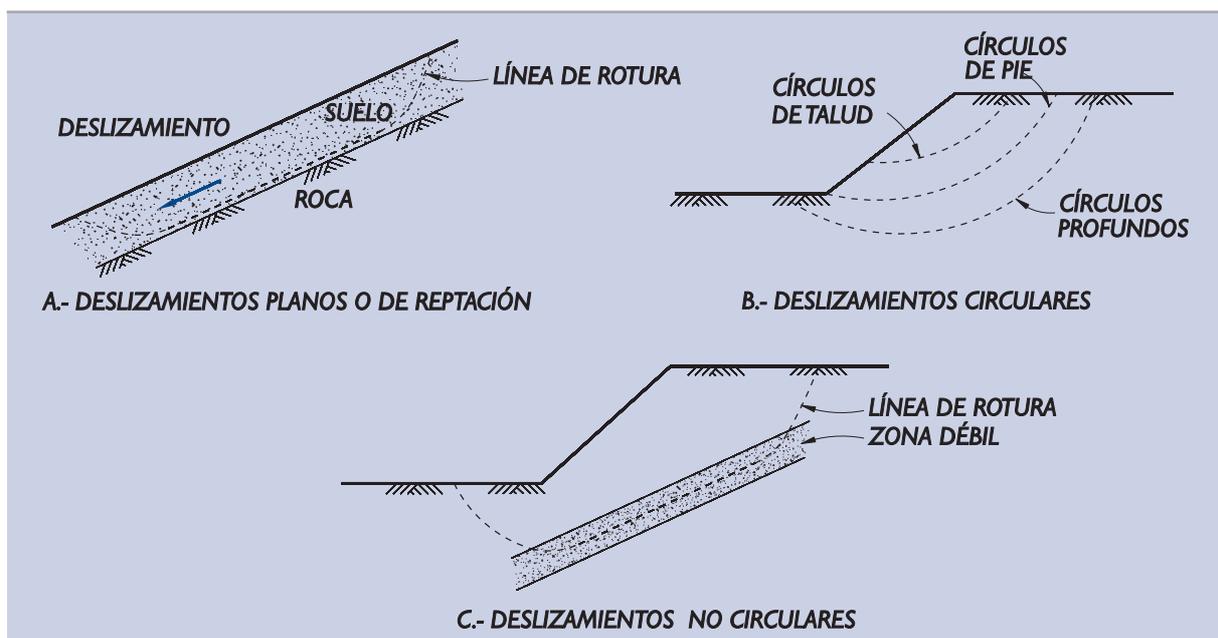
Este tipo de rotura es frecuente en las laderas naturales en las que el suelo que recubre a la roca o suelo firme subyacente desliza según una superficie que, en buena parte de su desarrollo, es paralela al borde externo del terreno natural. El deslizamiento se puede producir por obras de excavación (deslizamiento de la zona superior a la excavación) o por obras que aumenten la carga (estructuras o rellenos), produciéndose entonces el deslizamiento de la carga añadida y de la zona inferior de la ladera. La parte alta, como consecuencia, también puede deslizar. El deslizamiento también puede producirse por causas naturales (períodos de lluvia, por ejemplo).

b. Deslizamientos circulares

Los deslizamientos circulares son típicos de las formaciones en suelos homogéneos.

El deslizamiento como sólido rígido de la zona superior sobre la inferior a lo largo de una línea circular es el único movimiento cinemáticamente posible, incluyendo, evidentemente, los deslizamientos planos como caso límite.

Figura 3.8.2. Tipos de deslizamientos en suelos



Según las superficies de rotura sean más o menos profundas, los deslizamientos circulares se pueden producir mediante “círculos de talud” que interesan a éste parcialmente, mediante “círculos de pie” que pasan por el pie del talud o mediante “círculos profundos” que intersectan a la obra más allá del pie del talud. Ver Fig. 3.8.2.

En suelos heterogéneos, ya sean taludes de excavación o taludes de relleno, las líneas de rotura suelen parecerse a estas de sección circular, de manera que la hipótesis de rotura según este tipo de líneas es adoptada en la mayoría de las situaciones. Esto no excluye el tanteo de otros tipos de línea de rotura en aquellos casos en los que la disposición del terreno indique otras posibles formas, no circulares, que pudieran ser más críticas.

c. Deslizamientos no circulares

En algunas ocasiones la configuración del terreno, particularmente la disposición de algunas zonas más débiles, hace que sea necesario considerar superficies de rotura cuya sección plana no pueda aproximarse a una circunferencia.

3.8.4.2 Caracterización de las situaciones de proyecto

Para analizar un problema de estabilidad global es necesario conocer su configuración geométrica, las acciones externas que pudieran afectar y las características resistentes del terreno.

a. Definición de los parámetros geométricos

Salvo casos excepcionales, la geometría del problema se definirá mediante una sección plana representativa. Si existen dudas acerca de la sección plana que puede ser más crítica, se estudiarán diversas secciones para elegir, de entre ellas, la que resulte más crítica y exigir, en esa sección, los coeficientes de seguridad mínimos que se indican en el apartado 3.8.6.

Los elementos que definen la geometría son, entre otros, la distribución de suelos de distinta naturaleza y resistencia, así como la adecuada representación de la estructura, si ésta estuviera implicada en el análisis de estabilidad global.

Los contactos entre distintos terrenos se establecerán con prudencia. Los estratos más débiles deben representarse con los mayores espesores que razonablemente puedan tener. En ese sentido, el posible efecto beneficioso de la penetración de escolleras vertidas sobre suelos blandos no debe considerarse, salvo que sea un aspecto controlado y justificado por el ingeniero.

Un elemento clave de la configuración geométrica del subsuelo lo constituye la descripción del estado del agua. Esto es, su nivel freático en caso de una situación hidrostática, o la configuración de la red de filtración en caso de que el agua esté en movimiento.

Es aconsejable hacer estudios de sensibilidad respecto a las condiciones geométricas en aquellos casos en los que éstas no están definidas con precisión suficiente.

b. Definición de las acciones

Las acciones principales en el estudio de problemas de estabilidad global son las gravitatorias. Estas acciones serán calculadas, en la parte correspondiente al terreno, como el producto de las áreas correspondientes por los pesos específicos de cada una de ellas. Estos pesos específicos serán el valor medio de los resultados obtenidos de la investigación geotécnica, de acuerdo con lo definido en el apartado 3.3.5.2.

Las cargas transmitidas por las estructuras y las sobrecargas que puedan afectar serán definidas como el producto de sus valores nominales o característicos por los factores de compatibilidad, ψ , correspondien-

tes a la combinación de acciones considerada y por los coeficientes de mayoración que les correspondan en función del tipo de acción y del modo de fallo analizado. Ver apartados 3.3.5.3, 3.3.5.4 y 3.3.6.

El estudio de la estabilidad global debe realizarse para la combinación cuasi-permanente de acciones, así como para todas las combinaciones fundamentales, accidentales y sísmicas que sean relevantes.

c. Definición de las propiedades del terreno

Las operaciones de construcción en el entorno del talud o la actuación de las cargas modifican el estado tensional del terreno y éste ha de deformarse para adaptarse a las nuevas condiciones. Esa adaptación requiere un cierto tiempo que será tanto más largo cuanto más deformable y más impermeable sea el terreno. La resistencia del terreno cambia durante ese proceso de adaptación y esto introduce un elemento de indefinición a la hora de decidir sobre las características resistentes a considerar en el análisis de estabilidad.

Ante esa situación, el ingeniero debe considerar dos hipótesis extremas, denominadas “sin drenaje” y “con drenaje”. La situación real estará más o menos próxima a uno de esos extremos, según las circunstancias del caso. Ver 2.2.7.

Análisis sin drenaje

Esta hipótesis extrema se corresponde con la situación teórica en la cual no se produce una acomodación de la resistencia del terreno a un nuevo estado tensional, manteniendo éste las mismas características resistentes que tenía inicialmente. Las operaciones de construcción (rellenos, excavaciones, construcción de estructuras, aplicación de cargas, etc.) así como la aplicación de las cargas se supone que se realizan en un plazo tal que el terreno no tiene tiempo de acomodarse a la nueva situación.

La situación sin drenaje puede ser próxima a la realidad en aquellos terrenos que estén saturados y que tengan un coeficiente de consolidación bajo (o una permeabilidad reducida).

En los apartados 2.2.7, 3.4.11 y 3.10 se dan criterios sobre los tipos de terreno y situaciones de proyecto en los que se recomienda suponer esta condición sin drenaje.

La resistencia del terreno en situaciones sin drenaje se puede representar con los siguientes parámetros de cohesión y rozamiento:

$$\begin{aligned}c_u &= s_u \\ \phi_u &= 0\end{aligned}$$

donde:

s_u = resistencia al corte sin drenaje.

En la Parte 2 de esta ROM se indican los procedimientos (ensayos de campo y laboratorio) que el ingeniero puede utilizar para determinar valores adecuados de la resistencia al corte sin drenaje.

A la hora de fijar los valores de las acciones y las resistencias que deben figurar en los cálculos de estabilidad, deben considerarse las recomendaciones del apartado 3.3.

Análisis con drenaje

El cálculo de estabilidad en la situación con drenaje se corresponde con la hipótesis, también extrema, de una acomodación completa de la resistencia del terreno al estado tensional del subsuelo. Los excesos de presión intersticial transitorios, generados por las operaciones de construcción o las cargas aplicadas, habrían desaparecido.

Este tipo de cálculo será siempre imprescindible, independientemente de la naturaleza del subsuelo.

Los parámetros resistentes del terreno, para estos cálculos, serán obtenidos con las técnicas de ensayo indicadas en la Parte 2 de esta ROM.

La resistencia al corte en situaciones con drenaje estará, en general, representada por dos parámetros:

c = cohesión.

ϕ = ángulo de rozamiento.

Estos parámetros pueden ser distintos en cada uno de los distintos niveles del terreno.

En aquellos casos en que este aspecto pueda tener especial significación, los parámetros resistentes pueden ser considerados como variables dependientes del estado de tensiones del terreno (leyes de rotura no lineales simuladas con ángulos de rozamiento decrecientes con la presión).

En el apartado 2.2.8.1 se dan algunas explicaciones complementarias sobre estos parámetros.

A la hora de fijar los valores más adecuados de los mismos, a efectos de realizar las comprobaciones de seguridad, deben tenerse en cuenta las recomendaciones indicadas en el apartado 3.3.

Estos parámetros, en cualquier caso, se obtendrán de ensayos de laboratorio realizados con muestras completamente saturadas. Si se obtienen por vía indirecta, deben corresponder a esa condición de saturación completa.

En los taludes emergidos, sería posible suponer que, a largo plazo, el suelo no llega a saturarse y entonces contar con una resistencia mayor (c_{ap} y ϕ_{ap} que se definen en 2.2.8.2). Esta hipótesis no es recomendable ya que, en la mayoría de las obras marítimas y portuarias, esa saturación puede ocurrir en algún momento de la vida útil de la obra.

d. Colaboración de los elementos estructurales

Las superficies de rotura se desarrollarán, en su mayor parte, a través del terreno pero pueden afectar, en algunos casos, a elementos de la propia estructura.

En aquellos casos en los que la superficie de rotura potencial que se analiza implique la rotura por corte de algún elemento estructural, la resistencia de éste puede ser considerada como una acción externa que sería definida como el valor menor de los dos siguientes:

1. La fuerza que es capaz de soportar el elemento estructural dividida por la separación entre ese elemento estructural y los homólogos próximos en la dirección perpendicular al plano de estudio.
2. La resistencia que opone el elemento estructural al flujo plástico del terreno en su entorno. Esta resistencia se dividirá también por el espaciamiento indicado en el párrafo anterior.

Cuando el elemento estructural en cuestión no se repite con espaciamientos regulares puede tomarse como espaciamiento de cálculo la altura del talud, que, a estos efectos, se define como el desnivel entre los dos puntos de corte de la línea de rotura con la superficie exterior del terreno.

A la hora de evaluar la colaboración de los posibles elementos estructurales en la estabilidad global de la obra el ingeniero será prudente y estimará esas resistencias con criterios claramente conservadores.

En ese sentido es razonable suponer que el grado de seguridad de los elementos estructurales sea, al menos, igual y, preferiblemente, mucho mayor que el grado de seguridad del talud.

3.8.4.3 Principios generales del cálculo

a. Definición de la seguridad

Se define como coeficiente de seguridad al deslizamiento de un talud el número F por el que habría que dividir los valores de los parámetros resistentes para que se alcance la condición de rotura.

Los valores estrictamente necesarios que deben tener los parámetros resistentes para mantener el equilibrio serán una fracción de los valores reales. Cuando se utiliza el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb, resulta, para cada uno de los posibles terrenos involucrados en la estabilidad:

$$\begin{aligned} c_{\text{necesario}} &\leq c/F \\ F \cdot \text{tg } \phi_{\text{necesario}} &\leq \text{tg } \phi \end{aligned}$$

b. Consideración del efecto del agua

El efecto de la presencia del agua en los taludes puede ser representado en los cálculos de varias formas. No todas conducen siempre al mismo resultado y por eso conviene tener en cuenta las recomendaciones que siguen.

El estudio del efecto del agua exige, en cualquier caso, un análisis previo de la distribución de las presiones intersticiales en el terreno a través de la red de filtración o de otros métodos de análisis de los flujos del agua en el medio poroso (Ver apartados 3.4 y 3.10). Si no existen gradientes de potencial de agua, el régimen de presiones será hidrostático y bastará con definir la posición del nivel freático.

Salvo en algunos casos extremos (taludes completamente sumergidos y algunos casos de cálculo con $\phi = 0$), la presencia del agua hace que el problema de cálculo sea de talud heterogéneo. Los ábacos de Taylor, que más adelante se indican para terrenos homogéneos, no serían aplicables.

Taludes en régimen hidrostático

Cuando el talud está en régimen hidrostático existen dos alternativas de cálculo. Pueden calcularse pesos totales y después considerarse las subpresiones (alternativa n° 1). Pueden calcularse pesos efectivos, utilizando los pesos específicos sumergidos por debajo del nivel del agua, y no considerar la subpresión (alternativa n° 2).

En la alternativa n° 1, además, si existe agua libre, ésta debe contemplarse como un material más, con peso y sin resistencia al corte.

Ambas alternativas son, en principio, lícitas y conducen al mismo resultado siempre que el empuje entre rebanadas se suponga horizontal. El lugar por donde discurra la línea de rotura dentro del agua libre no repercute en los resultados. Con otras hipótesis de cálculo el resultado puede ser diferente.

En cualquier caso, por su sencillez, es recomendable utilizar la alternativa n° 2 como procedimiento general. Si se utiliza la alternativa n° 1 es recomendable suponer que el empuje entre rebanadas es horizontal o al menos limitar su inclinación severamente.

Taludes con filtración

Cuando existen gradientes de agua se puede calcular con los pesos totales y considerar las presiones externas y las subpresiones internas del agua (sería equivalente a la alternativa n° 1 descrita en el apartado anterior). El agua libre que pudiera existir debe ser considerada como un material más, con peso pero sin resistencia al corte.

Si existe agua libre (taludes total o parcialmente sumergidos pero con gradientes de agua) se puede calcular con otro procedimiento. El nivel de agua libre, que puede quedar poco definido, puede ser cualquiera y, además, no tiene por qué ser horizontal. En general debe elegirse, como nivel de agua libre, la superficie libre de la red de filtración correspondiente a la situación de proyecto que se analiza. Se calcularían los pesos efectivos. Esto es, utilizando los pesos específicos sumergidos por debajo del nivel del agua libre y los aparentes por encima de él. Se contabilizaría la subpresión y la presión que pudiera existir por encima del nivel del agua libre. Por debajo de ese nivel se contabilizaría como presiones externas y como subpresión, únicamente, la diferencia entre la presión de agua existente y la presión hidrostática correspondiente al nivel de agua libre. Para realizar los cálculos, o bien se utilizan directamente las diferencias de presión que se acaban de mencionar o bien, si resultara más cómodo, se sustituirían esas diferencias de presión, por las fuerzas de arrastre correspondientes. Ver apartado 3.4.5. Esta forma, que a veces se denomina cálculo en presiones efectivas, ya sea con diferencias de presión o con fuerzas de arrastre equivalentes, sería equivalente a la alternativa n° 2, indicada antes.

La alternativa n° 2 es siempre recomendable. Los comentarios sobre la utilización de la alternativa n° 1 serían los mismos que se indican en el caso considerado anteriormente.

Cuando se realizan cálculos con $\phi = 0$ no es necesario conocer la red de filtración cuando el nivel de agua libre es horizontal. Los excesos de presión intersticial no influyen en el resultado.

Taludes de diques de abrigo

En estos casos la acción del agua es compleja, no pudiendo despreciarse las fuerzas de inercia. Para estas circunstancias ver apartado 4.7 y ROM I.I.

c. Hipótesis simplificativas

El cálculo del coeficiente de seguridad requiere, en general, conocer el estado tensional del terreno. Ese conocimiento es difícil de conseguir y por eso es preciso hacer algunas hipótesis simplificativas.

Cada método de cálculo hace alguna simplificación a ese respecto. El ingeniero debe conocerlas, particularmente cuando utiliza programas de ordenador como herramienta de trabajo. No todas las hipótesis simplificativas usuales son aceptables.

A continuación se describen algunos métodos de cálculo cuya utilización se recomienda para las distintas situaciones que pueden plantearse en el análisis de la estabilidad de distintas situaciones de proyecto. En el apartado 3.3.9, se hacen algunos comentarios sobre la aplicación de modelos numéricos más complejos.

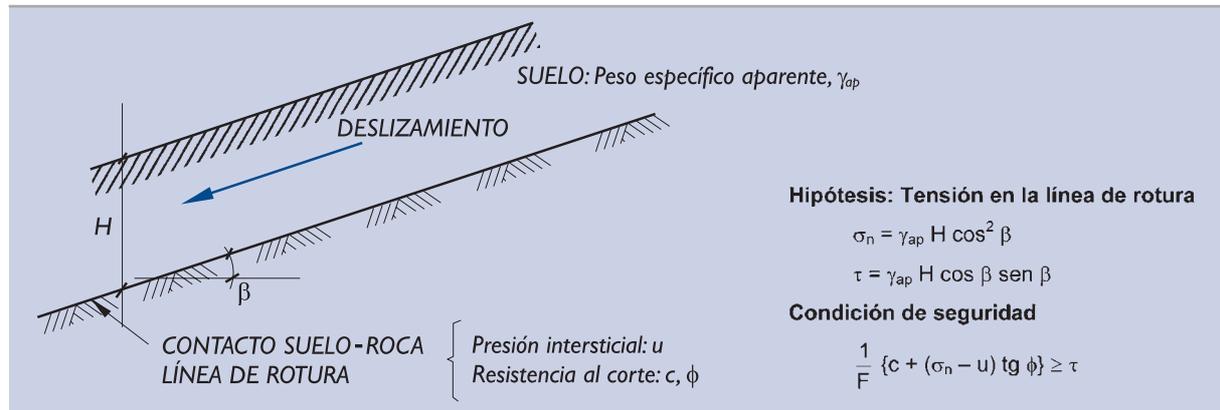
3.8.4.4 Deslizamiento plano indefinido

Se denomina con este nombre al deslizamiento de suelos sobre rocas u otros suelos más firmes a lo largo de superficies aproximadamente paralelas a la superficie exterior del terreno.

Cuando la línea de rotura es suficientemente alargada se pueden despreciar las condiciones de los bordes superior e inferior y verificar la seguridad tal como se indica en la Fig. 3.8.3.

Los datos necesarios para el cálculo son el peso específico aparente medio del suelo y las características resistentes del terreno en la zona próxima a la línea de rotura, que suele ser el contacto del terreno débil con el terreno más firme.

El método es de aplicación al estudio de la estabilidad de laderas naturales y puede utilizarse, también, para analizar taludes artificiales en los que un manto de suelo menos resistente cubre a una formación (artificial o natural) de mayor resistencia.

Figura 3.8.3. Comprobación de seguridad frente al deslizamiento plano indefinido

En general el método será de aplicación siempre que la superficie de deslizamiento sea de gran longitud comparada con su profundidad.

3.8.4.5 Estudio de deslizamientos circulares

La forma de rotura circular, aparte de que es próxima a las formas realmente observadas en la práctica, tiene la ventaja adicional de simplificar bastante los cálculos respecto a otras posibles formas de rotura.

Dentro de los métodos de cálculo basados en la hipótesis de rotura circular, cabe recomendar los que se citan a continuación.

3.8.4.5.1 MÉTODO DEL CÍRCULO DE ROZAMIENTO

Cuando el terreno es homogéneo o poco heterogéneo, de manera que la resistencia al corte pueda representarse con precisión suficiente mediante unos valores medios de los parámetros resistentes, se puede aplicar el método del círculo de rozamiento.

Según este método es preciso tantear varias líneas de rotura y comprobar que, para cada una de ellas, se cumple el criterio de seguridad correspondiente.

Para cada línea de rotura se deben realizar varios cálculos al objeto de obtener parejas de valores c, ϕ que conducen a una situación de equilibrio estricto. Con esas parejas de valores se dibujará después el diagrama de estabilidad (parte derecha de Fig. 3.8.4). Ese diagrama es el lugar geométrico de los valores de c y $\operatorname{tg} \phi$ que darían al talud un coeficiente de seguridad igual a la unidad.

Cada uno de los cálculos o tanteos se realizará suponiendo un valor arbitrario de la cohesión, c_i , para obtener el valor de ϕ_i correspondiente.

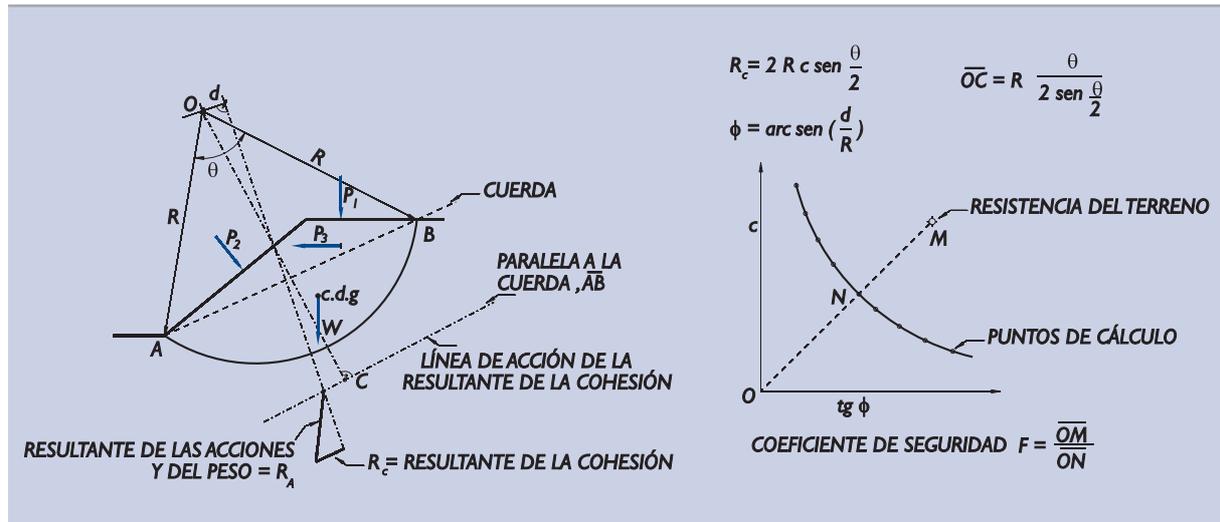
El cálculo correspondiente a una determinada línea de rotura, y a una determinada cohesión, se realiza mediante el proceso que se indica en la Fig. 3.8.4. Para cada línea de rotura ha de calcularse primero la resultante de las acciones, R_A , debidas al peso propio y posibles cargas externas y, después, la resultante de las resistencias debidas a la cohesión que se haya supuesto.

La distancia "d" del centro del círculo a la línea de acción de fuerza, que resulta al componer la resultante de las acciones y la resistencia debida a la cohesión, permite calcular el ángulo de rozamiento necesario para el equilibrio estricto que corresponde a la cohesión considerada.

Ese ángulo se calcula mediante la expresión siguiente:

$$\phi_{\text{necesario}} = \arcsen\left(\frac{d}{R}\right)$$

Figura 3.8.4. Esquema de cálculo mediante el método del círculo de rozamiento



Repetiendo el proceso para una serie de valores de la cohesión, se pueden obtener una serie de valores de los ángulos de rozamiento necesarios, para cada cohesión supuesta.

Con estas parejas de valores (c y $\operatorname{tg} \phi$ de los sucesivos cálculos) se puede construir la curva de resistencia necesaria que se indica en la Fig. 3.8.4.

La comparación entre la resistencia existente (punto M del diagrama de Fig. 3.8.4) y la resistencia necesaria, según se indica en esa figura, permite obtener el valor de F correspondiente a esa línea de rotura.

Una vez concluido el cálculo del coeficiente de seguridad particular de una determinada línea de rotura, se procederá al cálculo de la siguiente, y así sucesivamente, hasta tantear suficiente número de círculos para asegurar que la ubicación de la línea de rotura más crítica se conoce con la precisión adecuada.

El método del círculo de rozamiento tiene una inconsistencia básica. Las tensiones en la línea de rotura, una vez descontada la parte debida a la cohesión, están desviadas un ángulo ϕ respecto a la normal y, por lo tanto, pasan a una distancia $d = R \cdot \operatorname{sen} \phi$ del centro del círculo. Eso lleva a suponer que su resultante cumple también esa condición. Precisamente en este hecho se basa el cálculo de ϕ antes indicado. Y tal hecho no es cierto.

Debido a esa inconsistencia, el método del círculo de rozamiento puede conducir a errores, particularmente cuando los ángulos centrales " θ ", indicados en la Fig. 3.8.4, son grandes.

A pesar de ello, el método del círculo de rozamiento es el más adecuado para el estudio de taludes homogéneos sometidos a distintas cargas en su contorno e interior, aparte de la acción principal del peso propio.

3.8.4.5.2 ÁBACOS DE TAYLOR

Cuando sobre el talud homogéneo actúan exclusivamente las acciones gravitatorias, la comprobación de la seguridad por el método del círculo de rozamiento, tanteando un número de líneas de rotura suficientemente amplio, ha sido resuelto y tabulado en los ábacos de Taylor.

En esta solución, además, se tiene en cuenta la posible presencia de una capa rígida profunda que, si bien tiene poca trascendencia en aquellos casos en que el ángulo de rozamiento es apreciable ($> 10^\circ$), resulta decisiva en aquellos casos extremos del cálculo en situaciones sin drenaje, en los que se supone $\phi = 0$.

Para el caso particular de $\phi = 0$, se puede aplicar el ábaco de la Fig. 3.8.5, del que puede obtenerse la cohesión necesaria para el equilibrio estricto en función de los datos geométricos del talud, que se indican en esa figura, y del peso específico del suelo.

En el ábaco se indica, además, el tipo de línea circular cuya estabilidad requiere una cohesión más alta (línea de rotura crítica). Esa línea puede ser un círculo de pie, de talud o profundo. La forma genérica de estas tres tipologías puede verse en la Fig. 3.8.2 y, también, en la propia Fig. 3.8.5.

Una vez conocida la tipología de la rotura, la parte inferior de esta figura permite precisar la situación de la línea de rotura crítica.

En el mismo ábaco se indica, con una línea de puntos, la cohesión necesaria para que un talud sea estable según círculos de pie, en aquellas situaciones en las que realmente la línea más crítica resulta ser un círculo profundo. Esta información puede ser útil en algunas situaciones.

En excavaciones en zanja, con taludes en cada uno de sus costados, no se pueden producir deslizamientos profundos, particularmente si la zanja tiene un fondo estrecho. La propia geometría de la zanja condiciona la cinemática de la rotura. En esas ocasiones, o en otras semejantes, es conveniente conocer la cohesión necesaria para mantener el equilibrio según líneas que no sean tan profundas.

Para el caso general, cuando existe cohesión y rozamiento, la estabilidad puede analizarse mediante el ábaco de la Fig. 3.8.6.

Con este ábaco se pueden obtener parejas de valores de los parámetros resistentes (c y $\text{tg } \phi$) que conducen al equilibrio estricto. Con esas parejas de valores, se puede construir un diagrama similar al indicado en la Fig. 3.8.4, que facilita la comparación con los parámetros resistentes del terreno y permite, por lo tanto, calcular el coeficiente de seguridad.

Este ábaco permite, también, conocer el tipo de círculo que condujo, en los cálculos de Taylor, a la línea de rotura más desfavorable.

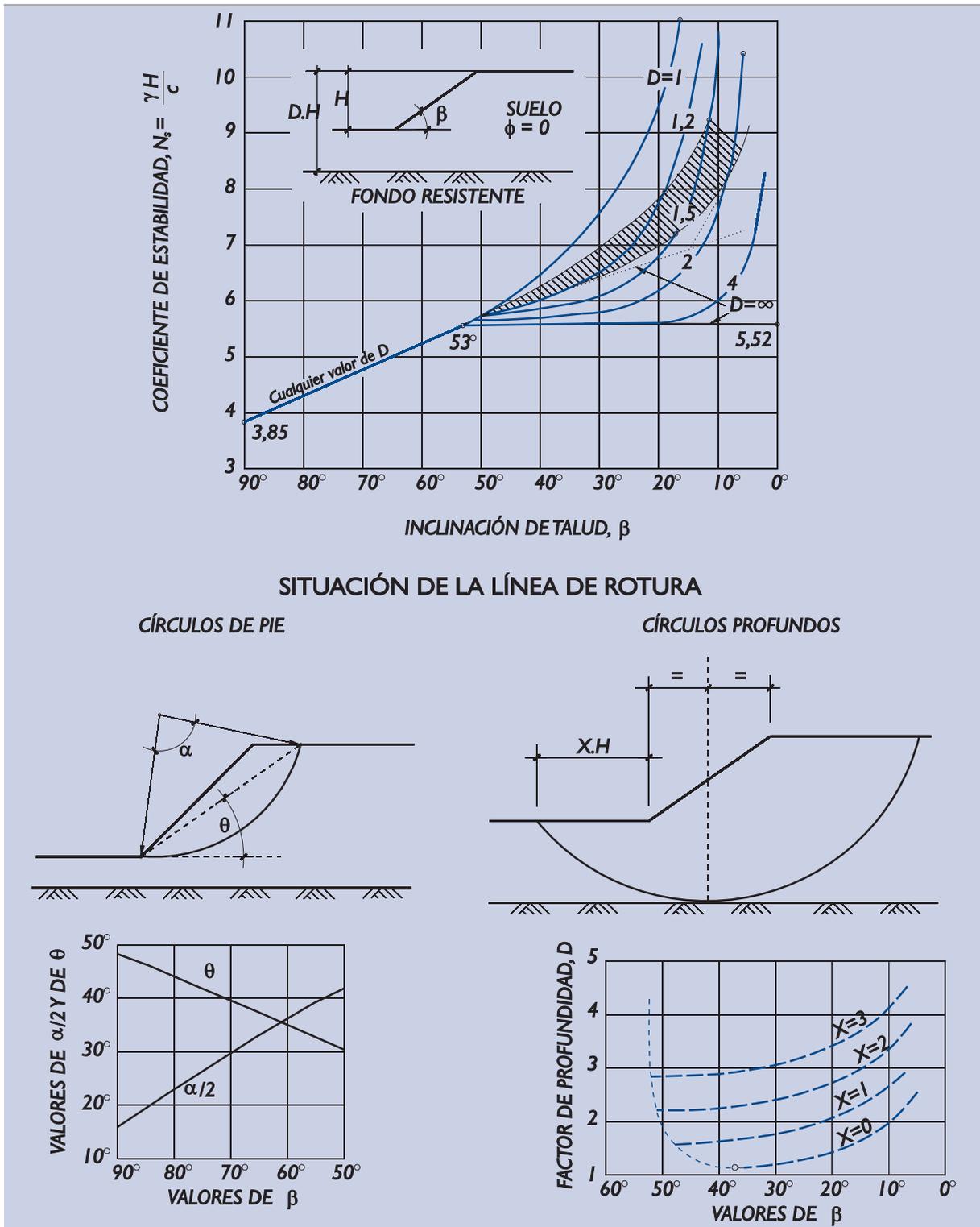
3.8.4.5.3 MÉTODO DE LAS REBANADAS. LÍNEAS CIRCULARES

Cuando el terreno dista de ser homogéneo y, además, existen movimientos del agua en su interior, el método de cálculo más adecuado es el método de las rebanadas, que se indica esquemáticamente en la Fig. 3.8.7.

La evaluación de la seguridad correspondiente a una determinada línea circular exige dividir la masa deslizante en varias rebanadas verticales, de manera que en su base pueda suponerse un terreno homogéneo y se pueda, además, representar su fondo curvo por una línea recta. Es frecuente, para las precisiones que usualmente se requieren, dividir la masa deslizante en un mínimo de unas 10 rebanadas.

La consideración del equilibrio vertical en cada rebanada y la del equilibrio global de momentos respecto al centro del círculo conduce a la definición del coeficiente de seguridad que se indica en la Fig. 3.8.7.

Figura 3.8.5. Ábaco de Taylor. Suelos puramente cohesivos, $\phi = 0$

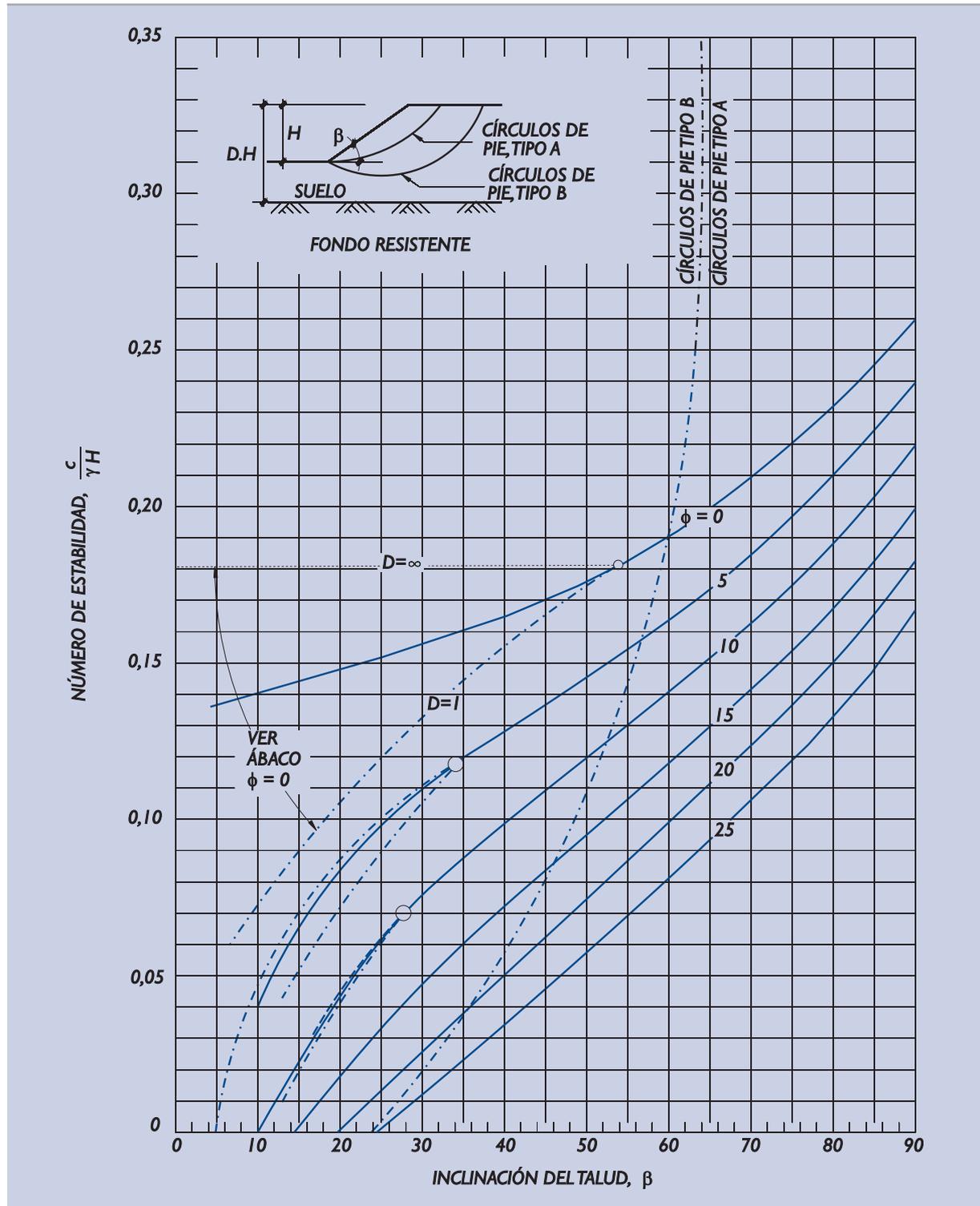


Nota: En la zona rayada y en su prolongación recta, para inclinaciones del talud mayores de 53°, la rotura se produce según círculos de pie. Por encima de esa zona la rotura obedece a círculos de talud y por debajo de ella a círculos profundos. La línea de puntos indica la estabilidad de círculos de pie en aquellos casos en que la rotura profunda es más crítica. Esta información puede ser útil para ciertos fines. Ver texto. La rotura según círculos que cortan al propio talud (círculos de talud), cuando ocurre, lo hace según círculos tangentes al fondo resistente.

Cuando se producen roturas mediante círculos profundos éstos tienen su centro situado en la vertical trazada por el punto medio del talud y son tangentes al fondo resistente.

Como puede verse, el coeficiente de seguridad no queda del todo definido, ya que las fuerzas ΔT no son conocidas. Según la hipótesis que se realice para calcularlas, resultará uno u otro procedimiento diferente. De

Figura 3.8.6. Ábaco de Taylor. Caso general, $\phi \neq 0$

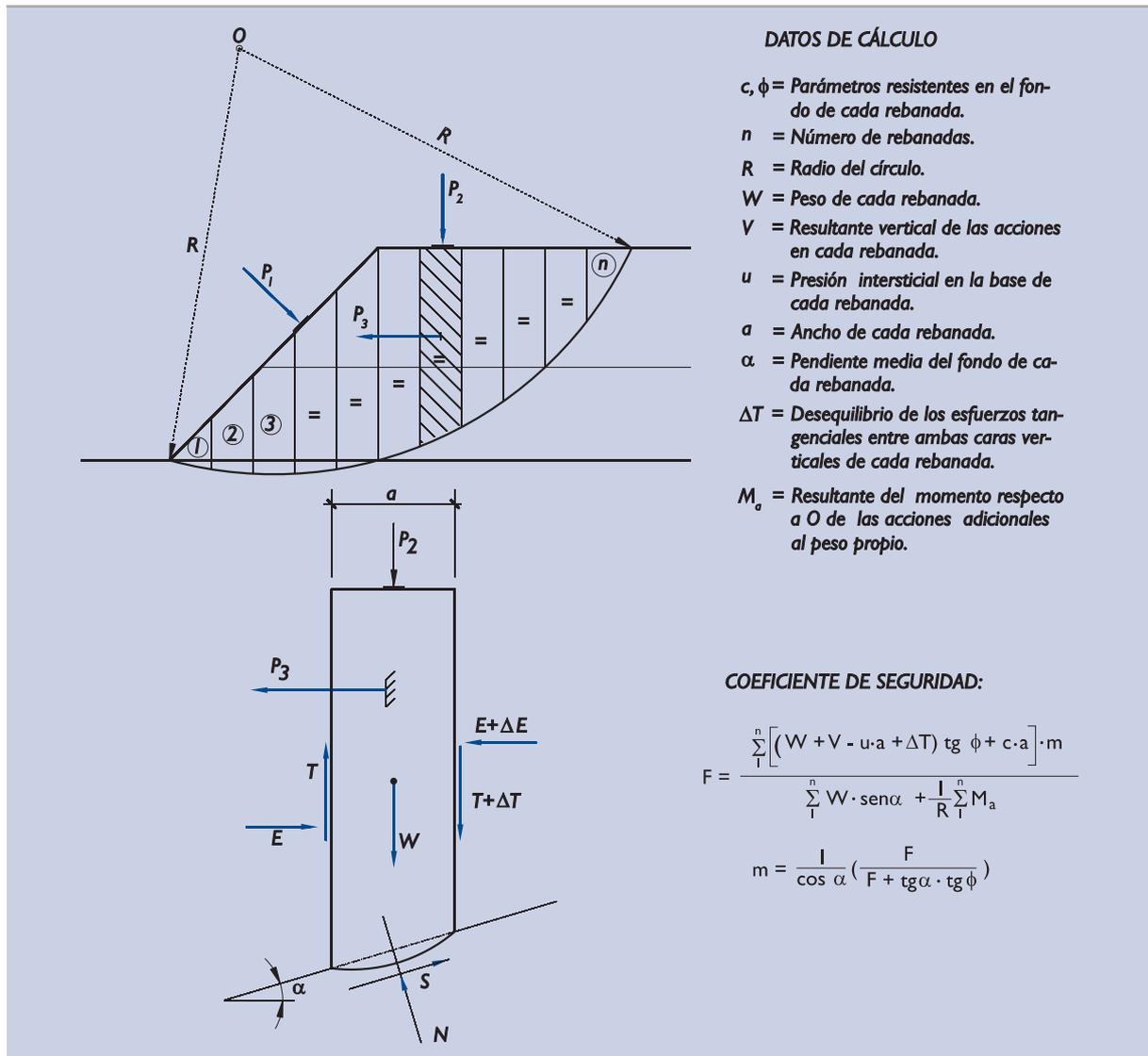


Nota: Las líneas de trazo discontinuo que se indican para ángulos de rozamiento pequeños corresponden a roturas según círculos profundos (trazo largo) o círculos de talud (trazo corto).
Para $\phi > 10^\circ$ se puede suponer que las líneas de rotura son, siempre, círculos de pie.

entre las hipótesis más razonables, conviene destacar la correspondiente al método simplificado de Bishop en el que se supone $\Delta T = 0$.

Dado que la expresión de la condición de seguridad no es explícita, el cálculo debe realizarse mediante tanteos. El cálculo iterativo suele ser rápidamente convergente pero ha de cuidarse el procedimiento cuando se realiza con ordenador, pues en teoría existen tantas soluciones (valores de F) al problema como rebanadas se utilizan en la división de la masa deslizante. Los programas de ordenador comerciales suelen determinar, para cada línea de rotura tanteada, el valor mayor de F que cumple la condición de seguridad. Pueden presentarse problemas de cálculo cuando aparezcan rebanadas con valores negativos de α . En estos casos el coeficiente F puede converger a valores anormalmente altos.

Figura 3.8.7. Esquema del método de las rebanadas en deslizamientos circulares



Este hecho puede ser particularmente acusado en aquellas líneas de rotura con contrapendiente fuerte en el pie, cuando en esta zona el terreno es granular. En esos casos la hipótesis $\Delta T = 0$ no es recomendable, ya que puede conducir a resultados optimistas (del lado de la inseguridad). Es, por lo tanto, preciso suponer valores razonables de ΔT o modificar, al menos localmente, la forma de la línea de rotura.

En el apartado 4.7.4.5.1 se indica un procedimiento adecuado para resolver este inconveniente en el estudio de la estabilidad de los diques de abrigo. Ese procedimiento puede ser útil en otros problemas similares.

3.8.4.6 Estudio de deslizamientos no circulares

3.8.4.6.1 MÉTODO DE LAS REBANADAS. LÍNEAS NO CIRCULARES

En aquellos casos en los que la configuración geométrica del terreno induzca a pensar en líneas de rotura no asimilables fácilmente a circunferencias, es preciso modificar las ecuaciones correspondientes ya que, en esos casos, la ecuación del equilibrio global de momentos toma otra forma, tal como se indica en la Fig. 3.8.8.

La solución del problema es similar a la descrita en 3.8.4.5.3. Igual que allí, es necesario hacer alguna hipótesis sobre los valores de ΔT . Es necesario, igualmente, un proceso iterativo para resolver el problema y también existen soluciones parásitas.

Se recomienda, en estos casos, o bien suponer $\Delta T = 0$ o bien intentar alguna hipótesis razonable sobre esos valores, pero entonces cumpliendo la ecuación global del equilibrio de momentos.

Los métodos que suponen cierta inclinación de los empujes entre rebanadas:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{T}{E}$$

sólo cumplen el equilibrio de momentos cuando ⁽¹⁸⁾:

$$\int_L R \cdot \operatorname{sen}(\delta - \alpha) dl = \sum H \cdot h$$

siendo R la resultante de E y T, esto es:

$$R = \sqrt{E^2 + T^2}$$

El método conocido con el nombre de Spencer supone que δ es un valor constante. Esta hipótesis es en general aceptable pero puede ser optimista en algunas circunstancias. Es posible que el ángulo δ necesario para satisfacer las condiciones de equilibrio sea excesivamente alto, particularmente si existen fuerzas horizontales aplicadas a la masa deslizante en el sentido desfavorable ($\sum H \cdot h > 0$). Los valores altos de δ pueden aumentar mucho la resistencia atribuida al pie de la línea de rotura, especialmente cuando en esta zona existe un ángulo de rozamiento elevado. El método de Spencer puede ser peligroso cuando en el pie del talud ϕ es alto y α es negativo.

El método de Morgenstern-Price supone que:

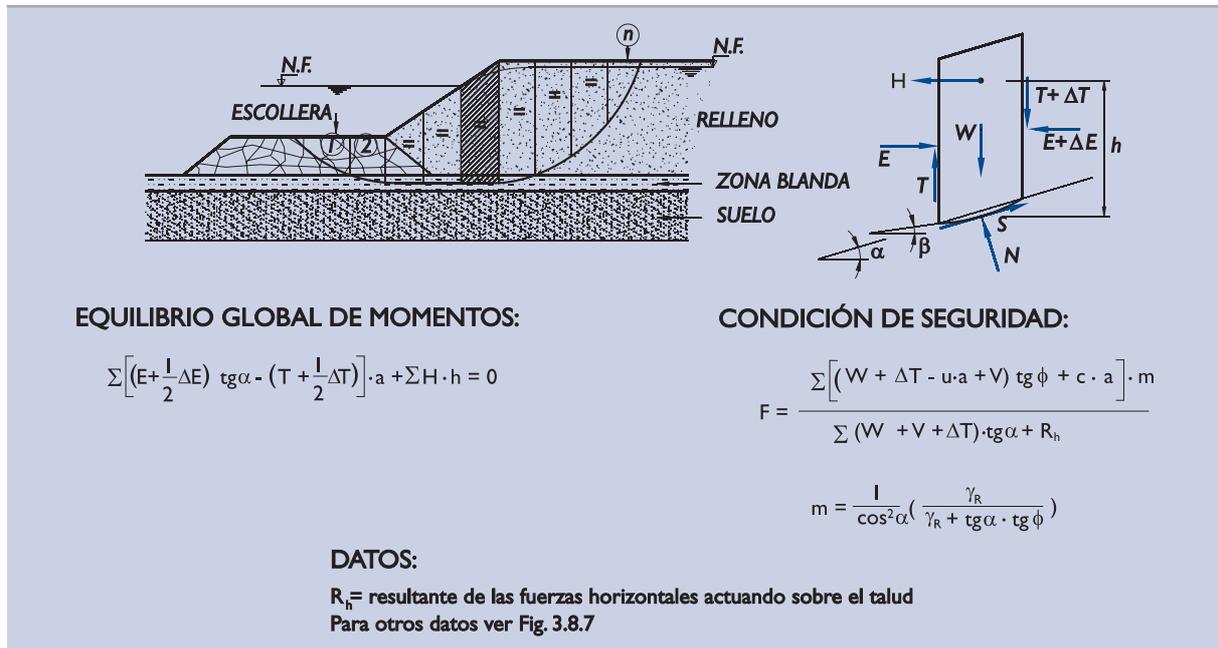
$$\operatorname{tg} \delta = \lambda \cdot f(x)$$

siendo λ una constante a determinar y $f(x)$ una función a especificar por el usuario. La variable x es la abcisa según un eje horizontal. El caso particular $f(x) = 1$ es el método de Spencer antes comentado.

Es claro que el método de Morgenstern-Price supone un avance hacia una mejor solución. El valor de λ que cumple las ecuaciones de equilibrio es:

(18) Para que exista equilibrio de momentos es necesario que la integral del flujo del vector \bar{R} a través de la línea de deslizamiento sea igual al momento de las fuerzas horizontales aplicadas a la masa deslizante.

Figura 3.8.8. Método de las rebanadas para superficies de rotura no circulares



$$\lambda = \frac{\sum H \cdot h + \int_L E \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot dx}{\int_L f(x) \cdot E \cdot dx}$$

Para evitar problemas de convergencia, algunos programas comerciales impiden que el usuario especifique valores negativos de $f(x)$ que podrían llegar a anular el denominador de la expresión precedente. Y, sin embargo, en algunos casos especiales (valores de α negativos en zonas con ϕ alto, por ejemplo) la solución adecuada exige que $f(x) < 0$.

Hay una alternativa elemental que suele seguirse y que consiste en no utilizar superficies de rotura con fuertes valores negativos de α (limitación de la pendiente de salida de las líneas de rotura en zonas con ϕ elevado). Aunque esto palía el problema, aún queda sin resolver completamente.

Finalmente, ha de advertirse que las líneas de rotura que se tanteen deben ser suaves, sin cambios bruscos de pendiente, cuidando su cinemática. Superficies poco realistas junto con ciertas hipótesis acerca de los valores de ΔT pueden conducir a coeficientes de seguridad extraordinariamente altos pero también a coeficientes de seguridad muy bajos.

Dado que el método de las rebanadas no tiene solución única, se recomienda utilizar alguna simplificación razonable. Si el asunto es de importancia, al menos la línea de rotura pésima encontrada en los cálculos debe recalcularse (a mano o con un programa de cálculo auxiliar) haciendo distintas hipótesis verosímiles sobre la dirección de las fuerzas entre rebanadas y tratando de cumplir la ecuación del equilibrio global de momentos que, en estos problemas, y según indica la experiencia, es de máxima importancia.

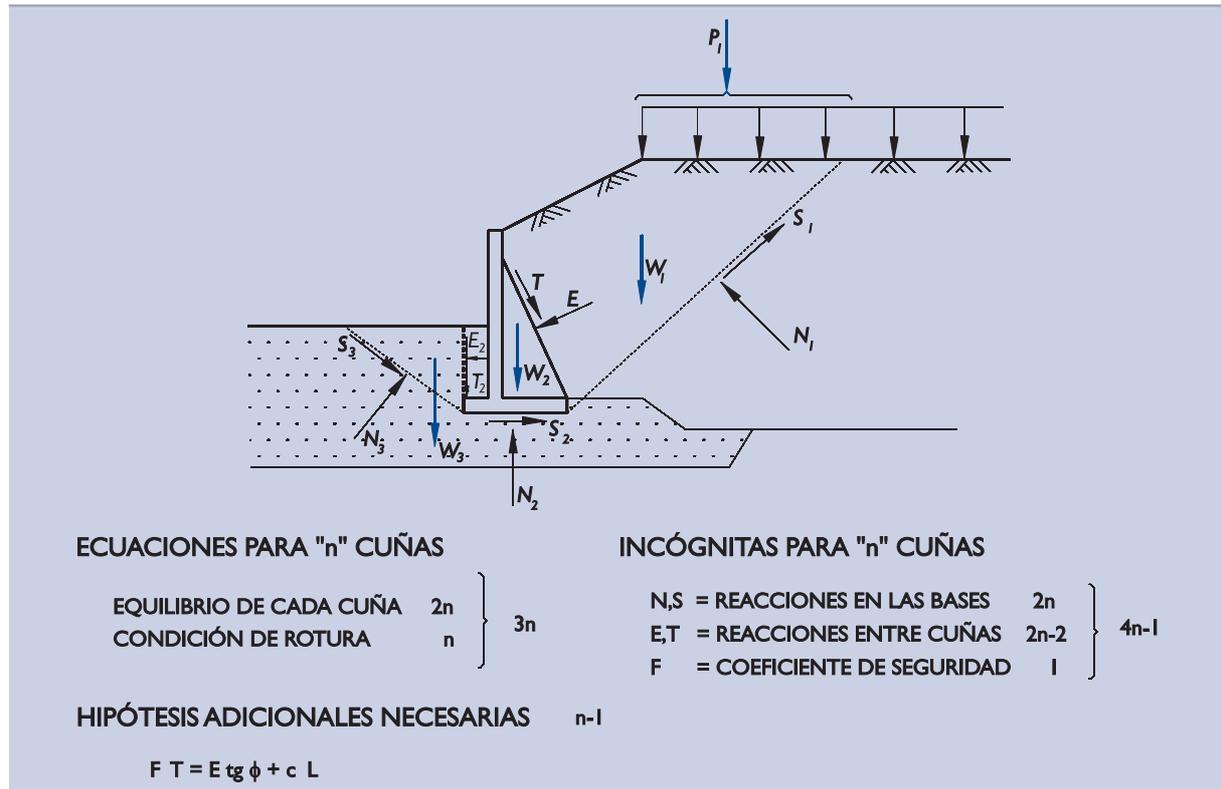
3.8.4.6.2 MÉTODO DE LAS CUÑAS

La división de la masa deslizante puede hacerse mediante líneas no verticales resultando así cuñas en lugar de rebanadas, tal como se indica en el esquema de la Fig. 3.8.9.

En esos casos se puede suponer un cierto movimiento relativo entre las cuñas y especificar algún dato sobre las relaciones entre las componentes tangencial "T" y normal "E" en las líneas de división, tal como la indicada en esa misma figura.

Este procedimiento de cálculo es, en general, más fácil de resolver, ya que no requiere dividir el conjunto en gran número de cuñas, resultando, por lo tanto, un número limitado de ecuaciones.

Figura 3.8.9. Esquema del método de las cuñas



El tanteo de posibles formas críticas de rotura debe extenderse no sólo a las localizaciones de la línea de rotura sino también a la inclinación de los planos de rotura entre cuñas.

El método puede tener la ventaja, sobre los métodos de rebanadas, de reproducir mejor la cinemática del movimiento en algunos casos concretos, además de ser más fácil de calcular. Sin embargo al no poderse plantear, al menos de una manera realista, el equilibrio global de momentos, es de temer que su precisión, en términos generales, sea menor que el de los métodos de rebanadas. Por eso, su utilización debe ser más restringida.

3.8.5 El cálculo de la estabilidad global en rocas

Los problemas de inestabilidad en macizos rocosos en las proximidades de desniveles importantes (taludes) tienen un carácter especial, ya que los macizos rocosos, en general, tienen un comportamiento en rotura muy condicionado por la existencia de planos de debilidad natural en sus juntas de estratificación (rocas sedimentarias) y en las diaclasas que existen en todo tipo de rocas.

En rocas muy diaclasadas, esto es, con espaciamento entre diaclasas pequeño, comparado con las dimensiones de la obra, y afectadas por familias de fracturas de distintas orientaciones, así como en las rocas muy altera-

das, es suficientemente conservador utilizar, para el estudio de estabilidad global, los procedimientos indicados en el apartado 3.8.4, suponiendo como resistencia al corte del terreno homogéneo equivalente el correspondiente a las litoclasas más débiles del macizo rocoso.

En rocas sanas, sobre todo si están poco diaclasadas, se deben utilizar procedimientos de análisis específicos de la mecánica de rocas para evaluar la seguridad frente a la estabilidad global de las obras realizadas en su entorno. En los apartados que siguen se dan algunas ideas básicas relativas a esos procedimientos de análisis.

3.8.5.1 Tipos de inestabilidad

En función de la orientación relativa del plano de discontinuidad principal del macizo rocoso (estratificación, esquistosidad, etc.) y a efectos de definir los procedimientos de análisis más adecuados, se pueden distinguir los tres casos típicos que se ilustran en la Fig. 3.8.10.

Cuando la dirección del plano del talud es sensiblemente paralela a la estratificación (o a la discontinuidad principal) y además el buzamiento de ésta resulta inferior al del plano del talud y del mismo signo, de manera que la estratificación buza hacia afuera, el mecanismo de rotura más crítico es de tipo plano.

En caso de que la dirección de la estratificación (o discontinuidad principal) resulte aproximadamente paralela al talud pero buzando hacia adentro, el mecanismo de rotura usualmente más crítico es el movimiento de bloques mediante vuelco (“toppling”).

El caso de deslizamiento más típico, sin embargo, es aquel en el que las direcciones de los planos de las discontinuidades principales y la dirección del plano del talud distan de ser paralelas. Entonces, la inestabilidad se puede producir a favor de dos planos de discontinuidad que delimitan una cuña cuya arista tenga salida hacia afuera del talud.

Además de esos tres tipos de rotura más elementales, existen otros de formas diversas tales como:

- ◆ Caída de bloques por descalce erosivo de estratos rocosos más blandos que los sustentan. Típico en series rocosas sedimentarias subhorizontales de estratos alternantes más y menos resistentes.
- ◆ Pandeo de estratos casi verticales en taludes excavados aproximadamente al hilo de la estratificación.
- ◆ Deslizamientos complejos en el entorno de zonas falladas.
- ◆ Deslizamientos a favor de capas especialmente débiles que puedan existir dentro del macizo rocoso y que queden próximas al talud de excavación.

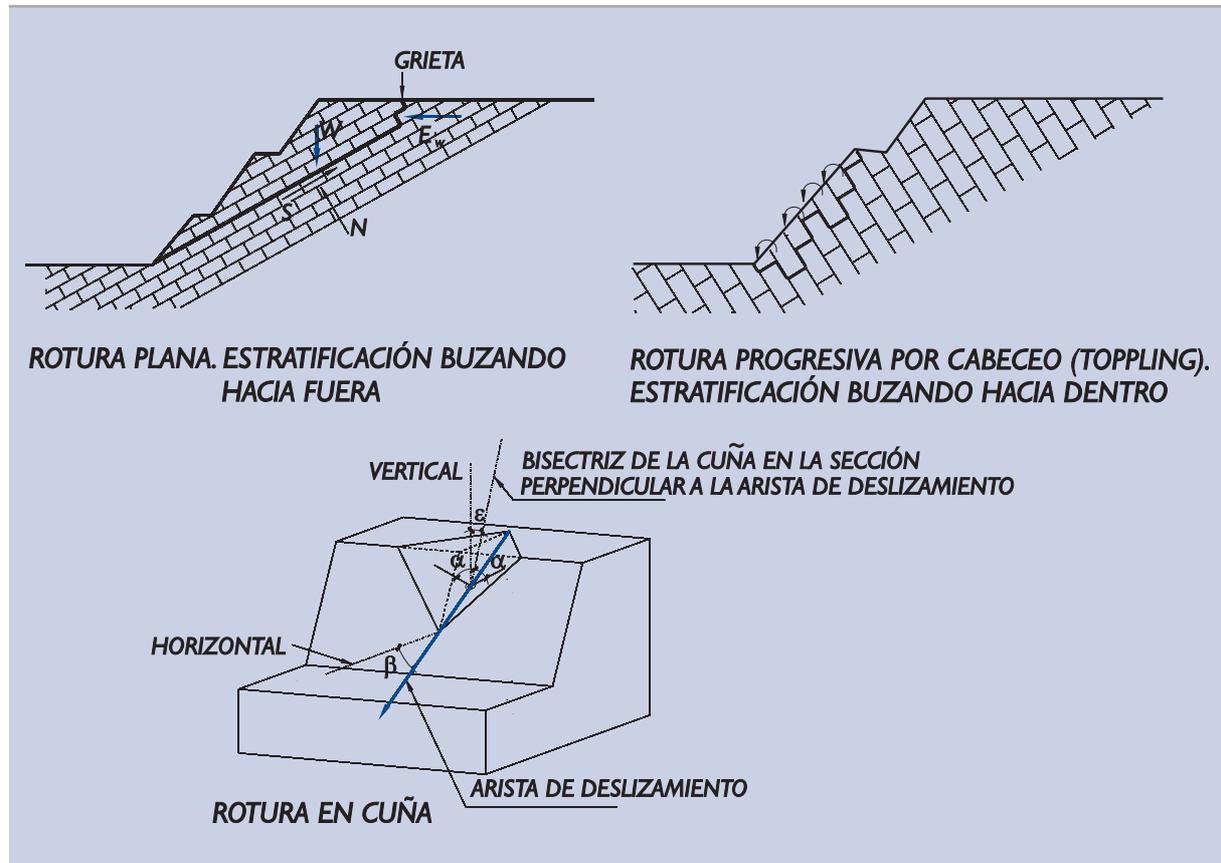
Cada tipología de inestabilidad será analizada con unos principios de cálculo comunes, tal como se indicará a continuación. Tales principios incluirán, además, la consideración de los efectos que pueden producir las acciones externas que puedan inducir obras próximas al talud rocoso o construidas en el propio talud, así como la consideración de los efectos estabilizadores producidos por los posibles elementos de contención.

Los procedimientos más clásicos de estabilización, en estos casos de roca sana, consisten en anclajes convenientemente dirigidos y su proyecto requiere estudios de estabilidad al deslizamiento que deben realizarse con los principios básicos que se indican a continuación.

3.8.5.2 Caracterización de la situación de proyecto

Los datos necesarios para el estudio de la estabilidad de macizos rocosos diaclasados son los relativos a la geometría, a las acciones y a la resistencia al corte a lo largo de las diaclasas.

Figura 3.8.10. Tipos de inestabilidades elementales en taludes rocosos



a. Definición de los parámetros geométricos

Los parámetros geométricos más importantes, aparte de los necesarios para describir la obra, son los relativos a la orientación de las discontinuidades de la roca.

Dado el carácter tridimensional del problema, su descripción geométrica suele ser compleja. A efectos de representar, de manera inteligible, la distribución de diaclasas, es preciso utilizar procedimientos especiales. Es, en este caso, recomendable utilizar la proyección estereográfica de igual área para representar las diaclasas medidas en el terreno. Cada diaclasa queda representada en ese diagrama por un punto y, del estudio de las nubes de puntos medidas en campo, se pueden obtener las orientaciones habituales de las distintas familias de diaclasas.

Además, de cada familia de diaclasas, será necesario conocer su continuidad, separación entre diaclasas consecutivas, etc. Es conveniente, en casos complejos o de cierta trascendencia, utilizar descripciones probabilísticas de los diaclasamientos de los macizos rocosos.

Un dato trascendente, en el estudio de la estabilidad de macizos rocosos diaclasados, es el relativo al estado de agua, ya que será necesario conocer, en las diaclasas que resulten más críticas, la presión del agua, que afectará de manera muy importante a la seguridad de la obra.

Los datos geométricos a adoptar en una determinada situación de proyecto serán una simplificación razonablemente conservadora de la realidad. En esta modelización geométrica se decidirá buena parte de la seguridad y por eso es recomendable, en casos de importancia, realizar cálculos de sensibilidad frente a las variables geométricas peor conocidas.

b. Definición de las acciones

Aparte del peso propio pueden actuar, en la situación del proyecto considerada, otras acciones tales como sobrecargas, pesos de parte de la estructura, etc. La forma de considerar esas acciones debe cumplir las ideas básicas indicadas en 3.8.4.2.b).

Los elementos de sujeción o estabilización del talud introducen, en general, uno de los dos tipos de fuerzas siguientes:

- a) Elementos activos. Suelen estar formados por anclajes largos y flexibles, colocados con carga inicial importante respecto a su carga de rotura.
- b) Elementos pasivos. Suelen estar formados por bulones cortos y rígidos colocados con carga inicial baja respecto a su carga de rotura.

La representación de los elementos activos en los cálculos de seguridad global, según líneas de rotura que los cortan entre la zona de su cabeza y la zona de anclaje en la roca profunda, puede realizarse mediante una fuerza igual a la carga de colocación aplicada en la zona de apoyo de su cabeza contra el talud rocoso. Para líneas de rotura que engloben su zona de anclaje, la presencia del elemento debe ser considerada de efecto nulo.

La presencia de elementos pasivos en los cálculos de estabilidad global quedará representada como una fuerza igual a la resistencia al arranque de la parte del elemento que queda fuera de la zona que puede deslizar.

La diferencia de tratamiento de uno y otro tipo de elemento estriba en la deformación necesaria para movilizar la fuerza resistente. Sería teóricamente infinita para los elementos activos y nula para los pasivos. En caso de requerirse cálculos precisos o en aquellas situaciones en las que existan elementos de tipo intermedio entre los dos citados, se podrá representar la acción debida a su presencia mediante las fuerzas que correspondan a unas deformaciones razonables que el ingeniero habrá de fijar.

c. Definición de las propiedades del terreno

La resistencia de la matriz de la roca sana, salvo en ocasiones muy excepcionales, no interviene en los cálculos de estabilidad global. Es, sin embargo, un índice útil para evaluar indirectamente la resistencia al corte de las diaclasas.

La resistencia al corte de las diaclasas debe determinarse o bien directamente mediante ensayos de laboratorio o de campo, o bien indirectamente según correlaciones previamente establecidas de acuerdo con la experiencia.

El criterio del ingeniero, en este caso, es primordial. La elección de una u otra correlación, o la decisión de realizar ensayos específicos, dependerá de la importancia del caso y de la experiencia local en temas similares.

En cualquier caso, para hacer una evaluación expresa del coeficiente de seguridad global del macizo rocoso, será necesario definir los parámetros de resistencia al corte según cada una de las familias de litoclasas diferentes encontradas en las investigaciones de campo.

d. Colaboración de los elementos estructurales

Cuando la superficie de rotura tanteada corte a otros elementos estructurales, la resistencia de éstos será estimada como si de un elemento de sujeción pasivo se tratase y esa resistencia será considerada como una acción externa.

3.8.5.3 Principios generales de cálculo

Para calcular el coeficiente de seguridad frente a la inestabilidad global de un talud en roca es preciso tantear cuantos mecanismos de rotura sean imaginables y tengan una cinemática posible.

Cada uno de esos mecanismos está definido por una superficie de rotura que aísla la zona que se movería respecto de la zona que quedaría en reposo. Dentro de la zona que desliza se pueden producir, además, roturas internas con deslizamientos de unas zonas sobre otras.

El coeficiente de seguridad correspondiente a un posible mecanismo de rotura concreto se define como el factor F por el que habría de minorarse la resistencia al corte en la superficie de rotura tanteada, de manera que, en la situación de proyecto que se considera, se cumpliera el equilibrio estricto.

El coeficiente de seguridad frente a la estabilidad global de la obra será el menor de los encontrados tras analizar varias formas de rotura y considerar, dentro de cada forma, distintas variantes de detalle en cuanto a la definición concreta de los planos de rotura.

El cálculo concreto según una determinada línea de rotura se hará de acuerdo con los principios básicos de la mecánica racional. A esos efectos se indican algunas recomendaciones concretas en los apartados que siguen, para cada uno de los tres tipos elementales de inestabilidad de macizos rocosos sanos diaclasados.

a. Deslizamientos planos

En este tipo de situaciones conviene proyectar todas las acciones según dos direcciones, una normal y otra tangente al plano de deslizamiento.

Debe considerarse que en la cabeza del posible deslizamiento puede existir, previamente, una grieta de tracción llena de agua con el correspondiente empuje hidrostático.

La componente normal "N" y la posible subpresión en el plano de deslizamiento "S_w" permitirán evaluar la resistencia al corte:

$$\text{Resistencia} = (N - S_w) \operatorname{tg} \phi + c \cdot A$$

donde:

$c, \operatorname{tg} \phi$ = parámetros resistentes en el plano de deslizamiento.

A = área donde actúan N y S_w .

Comparando esa resistencia con la componente tangencial "T" de la resultante de las acciones, se obtiene el coeficiente de seguridad:

$$F = \frac{\text{Resistencia}}{T}$$

b. Vuelco o cabeceo de estratos. (Toppling)

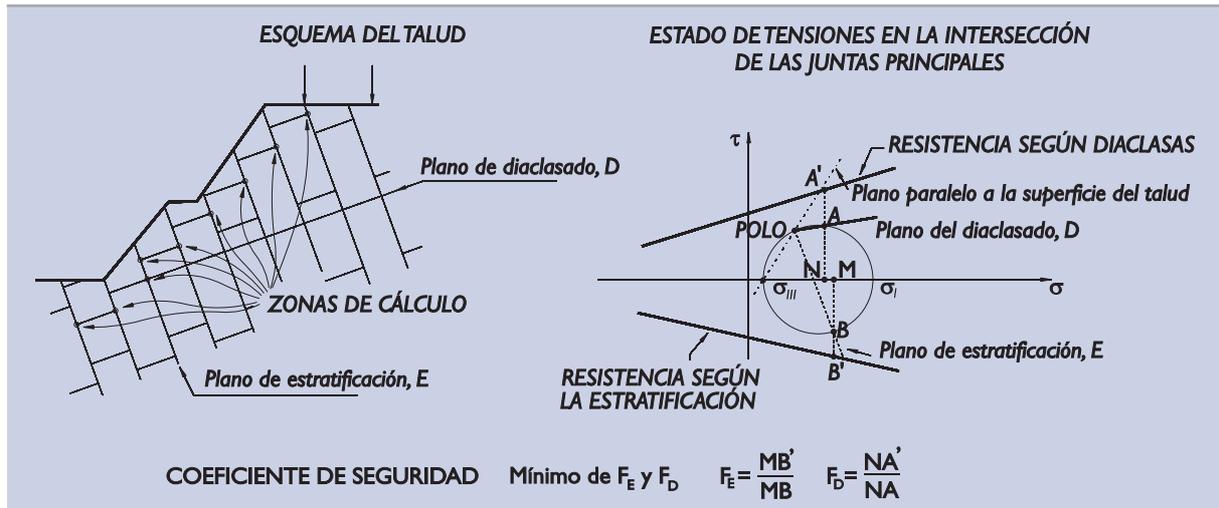
El estudio de estos casos, si el problema es de importancia, requiere hacer hipótesis sobre el detalle de los bloques existentes. Existen procedimientos de cálculo específicos que permiten esos estudios de detalle.

En general se considera suficientemente próximo a la realidad y suficientemente seguro calcular, como si de un terreno homogéneo se tratara, el estado tensional en el entorno del punto crítico donde se teme el inicio del vuelco. A esos efectos deberán realizarse tanteos, suponiendo distintas localizaciones de ese punto.

La definición del estado tensional puede requerir la utilización de soluciones publicadas en la literatura técnica o un cálculo numérico previo.

Definido el estado tensional en el punto en cuestión mediante su círculo de Mohr, tal como se indica en la Fig. 3.8.11, se puede estimar la sollicitación de corte en los planos de las diaclasas y, con estos datos, evaluar el coeficiente de seguridad correspondiente.

Figura 3.8.11. Procedimiento simplificado de evaluación de la seguridad. Taludes rocosos diaclasados



El coeficiente de seguridad mínimo alcanzado en diversas evaluaciones (según distintas litoclasas y en distintas zonas) será asignado como coeficiente de estabilidad del talud correspondiente.

c. Deslizamientos en cuña

Identificada como cinemáticamente posible una determinada cuña formada por dos planos A y B, el problema mecánico resulta estáticamente determinado cuando se hace alguna hipótesis razonable para repartir las acciones sobre la cuña en las reacciones sobre A y B. A estos efectos es razonable y recomendable suponer que los esfuerzos de corte en las diaclasas son paralelos a la arista de deslizamiento.

Conviene citar que, para aquellos casos en los que no exista ni cohesión ni subpresión en las diaclasas y en los que, además, ambas diaclasas tengan igual rozamiento, el coeficiente de seguridad natural (sin acciones externas ni elementos de sujeción) viene dado por:

$$F = K \cdot \frac{\operatorname{tg} \phi}{\operatorname{tg} \beta}$$

donde:

- ϕ = rozamiento en las diaclasas.
- β = pendiente de la arista de deslizamiento.
- K = factor de cuña.

El factor de cuña viene dado por:

$$K = \frac{\cos \varepsilon}{\operatorname{sen} \alpha} \leq 1$$

donde:

ε = ángulo formado por el plano bisector de la cuña y el plano vertical de la arista de deslizamiento.

α = semiapertura del diedro de la cuña.

El significado de estos ángulos se indica en la Fig. 3.8.10.

3.8.6 Coeficientes de seguridad mínimos frente a la pérdida de estabilidad global

Los coeficientes de seguridad mínimos exigibles frente a los Estados Límite Últimos de estabilidad global deberán fijarse oportunamente en las bases de proyecto de cada obra en cuestión, en función de la importancia de la obra y de las consecuencias del fallo.

En términos generales, se considera aceptable que, en obras de ISA bajo, para la verificación de la seguridad frente al modo de fallo de pérdida de la estabilidad global, analizada con los criterios precedentes, se admitan como coeficientes de seguridad mínimos los incluidos en la Tabla 3.8.1.

Tabla 3.8.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de la estabilidad global. Obras con ISA bajo (5 a 19)

Combinación de acciones	Coeficientes de seguridad, F
Cuasi-Permanente, F_1	1,4
Fundamental, F_2	1,3
Accidental o Sísmica, F_3	1,1

Para obras con ISA no significativo o alto, o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos de F establecidos en la Tabla 3.8.1 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

3.8.7 Consideración de las deformaciones

En general, no deben colocarse estructuras rígidas en las proximidades de los taludes, ya que las deformaciones del terreno en su entorno suelen ser importantes. A pesar de ello, habrá situaciones en las que será imprescindible construir estructuras en la zona de afección de los taludes.

El cálculo de los movimientos en el entorno de los taludes debe realizarse mediante procedimientos numéricos. Se recomienda la utilización de métodos basados en la teoría de la elasticidad, ya sea lineal o no lineal. Tales procedimientos se consideran tanto más aplicables cuanto mayor sea el coeficiente de seguridad global.

Las deformaciones obtenidas serán, en todo caso, poco precisas por lo que, en general, se supondrá que una situación es aceptable cuando las deformaciones resultantes de la mejor estimación sean, al menos, tres veces menores que la que producen daño en la estructura próxima al talud.

A efectos de mejorar el grado de conocimiento y en aquellos casos en los que el aspecto deformacional sea importante, se recomienda especificar, como medida preventiva, la observación cuidadosa de movimientos durante la construcción, así como incluir las disposiciones contractuales oportunas para poder adaptar la obra en función de los resultados de estas observaciones.

3.9 MEJORA DEL TERRENO

3.9.1 Aspectos generales

La calidad del terreno puede ser mejorada mediante los distintos tipos de tratamiento que se indican en esta parte de la ROM.

Es posible que, en determinadas circunstancias, el tratamiento del terreno para mejorar alguna de sus características sea más conveniente que adaptar la solución de proyecto a las condiciones naturales del terreno.

Como ejemplo claro de esa situación se quiere citar la construcción de pavimentos sobre rellenos recientes. En esos casos el tratamiento del relleno y de su cimiento (si es que éste también es mejorable) puede ser más conveniente que construir un pavimento provisional y proceder a su reposición posterior. Ambas alternativas deben estudiarse y compararse.

Algo similar puede decirse respecto a la construcción de instalaciones ligeras sobre suelos blandos. Es posible resolver el problema de su cimentación mediante cimentaciones profundas o bien, alternativamente, con cimentaciones superficiales realizadas directamente sobre el terreno después de algún tratamiento de mejora.

Los tratamientos de mejora de terreno “a posteriori” son una solución casi obligada, en algunos casos patológicos.

Como caso excepcional debe citarse el tratamiento antilicuefacción de depósitos de suelos potencialmente inestables durante un hipotético terremoto u otras vibraciones similares. El tratamiento del terreno es, prácticamente, una medida ineludible.

Hay situaciones en las que la mejora del suelo no es procedente. Es más fácil y económico adaptar la solución proyectada a la calidad del terreno que proceder a su mejora.

Quiere adelantarse aquí, como punto de partida, que la mejor solución de tratamiento de un terreno problemático es su excavación y sustitución por otro mejor. Esa solución, adoptada en muchas ocasiones, ha de plantearse siempre como la primera alternativa.

Las técnicas actuales del tratamiento del terreno están encaminadas a aumentar la resistencia, a disminuir la deformabilidad o a disminuir la permeabilidad, ya sea de forma generalizada en toda su masa o en zonas locales, y ya sea de una manera permanente o transitoria.

A efectos de exposición en esta ROM, se han clasificado los procedimientos de mejora en los distintos tipos que se comentan a continuación. Esta división tiene el único objeto de facilitar los comentarios y las recomendaciones que se quieren hacer acerca de ellos. La clasificación no es fácil pues, como se verá, existen procedimientos mixtos que participan de las características de dos o más de los procedimientos que se describen.

Debe mencionarse también que no es clara la separación entre lo que es un tratamiento de mejora del terreno y lo que es un trabajo de ejecución de cimentación. Tal es el caso de las inclusiones rígidas descritas en el apartado 3.9.6 ó incluso algunos procedimientos de vibración profunda descritos en 3.9.3 ó de inyecciones mediante jet-grouting descritos en 3.9.7.4. Estos procedimientos pueden también considerarse como casos especiales de cimentaciones profundas mediante pilotajes no convencionales. En ese sentido, los procedimientos indicados en el apartado 3.6 de esta Recomendación pueden ser de aplicación al estudio de estos tipos de tratamiento de mejora.

También ha de añadirse que la compactación superficial es siempre adecuada como tratamiento único o como tratamiento complementario al realizado con otras técnicas.

3.9.2 Precargas

3.9.2.1 Mejoras producidas por las precargas

Los terrenos que han de ser sometidos a una cierta carga se deforman más la primera vez que tal carga actúa que en ocasiones posteriores. La primera carga deja al suelo con mayor resistencia y menor deformabilidad, aunque tal carga sea retirada. Los terrenos arcillosos, en particular, son muy sensibles a este efecto beneficioso de las precargas.

Por otro lado, conseguir el efecto beneficioso de las precargas puede requerir un tiempo grande en aquellos terrenos que estén saturados. Ese tiempo es tanto mayor cuanto mayor sea el espesor de suelo blando, cuanto mayor sea su compresibilidad y cuanto menor sea su permeabilidad. Por ese motivo, las precargas aceleradas con medidas de drenaje artificial pueden ser mucho más efectivas.

Considérese, a modo de ejemplo, el muro en L que se indica en el croquis de la Fig. 3.7.3. En ese caso, con el trasdós virtual vertical, se obtendría un gran peso equivalente del muro W_o , que englobaría el de las tierras en la zona rayada, y un empuje horizontal E_a .

Las precargas aumentan la densidad del terreno, incrementan su resistencia y disminuyen su deformabilidad, mejorando así las condiciones frente a posibles problemas de estabilidad y frente a futuros problemas de deformaciones.

La precarga es un procedimiento tan efectivo que su consideración es siempre recomendable.

En cada caso particular y en función de las condiciones concretas de cada lugar, se conseguirán unos u otros efectos beneficiosos. El estudio de las precargas permitirá hacer una estimación razonable de estos efectos.

En la Tabla 3.9.1 se indican, sólo con fines ilustrativos, unas ideas sobre las mejoras que podrían inducir las precargas en dos tipos de suelo.

Tabla 3.9.1. Ejemplo de posibles mejoras producidas por precargas

	Antes de la precarga	Después de la precarga
Suelos Cohesivos Blandos		
Peso específico seco, γ_d (kN/m ³)	12	15
Módulo de deformación (edométrico), E_m (MPa)	2	10
Resistencia al corte sin drenaje, s_u (kPa)	10	20
Suelos Arenosos Flojos		
Densidad relativa, D_r (%)	40	70
Módulo de elasticidad, E (MPa)	10	30
Ángulo de rozamiento interno, ϕ	28	32

3.9.2.2 Tipos de precargas

La precarga más clásica consiste en colocar tierras sobre los rellenos artificiales o suelos naturales blandos que se quieren mejorar, de manera que se produzcan asentamientos al consolidar el suelo bajo el peso de las tierras. Las tierras se retiran después total o parcialmente.

La precarga puede conseguirse por otros procedimientos, entre ellos:

- ◆ Acopio de bloques de hormigón o de mercancías pesadas.
- ◆ Cargas de agua en recintos estancos (depósitos).

- ◆ Rebajando artificial y temporalmente el nivel freático.
- ◆ Mediante gatos y anclajes en zonas localizadas.

La aceleración del proceso de consolidación mediante drenes artificiales es adecuada en aquellos casos en que los tiempos de consolidación son importantes.

Los drenes que comúnmente se utilizan son bandas drenantes prefabricadas. En el pasado se utilizaron drenes cilíndricos de arena que hoy parecen menos eficaces, aunque pueden tener algún otro efecto secundario beneficioso como elemento de refuerzo.

3.9.2.3 Reconocimientos previos

Antes de proyectar una precarga es preciso reconocer el terreno para determinar su estratigrafía, así como sus características geotécnicas. El reconocimiento geotécnico previo con ensayos de penetración estática continuos, especialmente midiendo las presiones intersticiales (piezocono o ensayo CPTU), es especialmente indicado. En particular es necesario conocer, de cada estrato o nivel:

- ◆ Densidad y humedad natural.
- ◆ Módulos de deformación.
- ◆ Coeficiente de consolidación.

Estos datos se pueden obtener directamente mediante ensayos edométricos realizados con muestras inalteradas. Pueden obtenerse también indirectamente mediante correlación con otros ensayos.

También es necesario investigar la resistencia al corte del terreno natural, no sólo para compararla con la resistencia correspondiente después del tratamiento, sino también para analizar los problemas de estabilidad que pueden provocar las precargas. Cargas de tierra altas en zonas de suelos blandos pueden provocar la rotura del terreno a corto plazo. Este problema debe ser considerado ya que, de ocurrir, significaría el hundimiento de la zona precargada, particularmente en sus bordes.

Los ensayos de molinete (vane test) o los ensayos de penetración estática son especialmente interesantes para conocer la resistencia en estos casos. Los ensayos triaxiales de laboratorio pueden ser también necesarios cuando el problema de la resistencia resulta crítico.

Es de especial importancia, en aquellos casos en los que se pretende acelerar la consolidación incluyendo drenes artificiales, considerar la anisotropía del suelo en cuanto a su coeficiente de consolidación, c_v , ya que éste suele ser, en muchos suelos naturales, varias veces mayor en la dirección horizontal que en la dirección vertical que es la que comúnmente se ensaya en laboratorio. Esa consideración puede hacerse vía empírica, por comparación con experiencias similares o mediante ensayos especiales de laboratorio con flujo horizontal.

El ensayo de penetración estática con medida de presiones intersticiales (piezocono), realizando paradas esporádicas para analizar la consolidación del exceso de presiones intersticiales provocado por la hincada del cono, es especialmente indicado a este respecto.

3.9.2.4 Proyecto de precargas

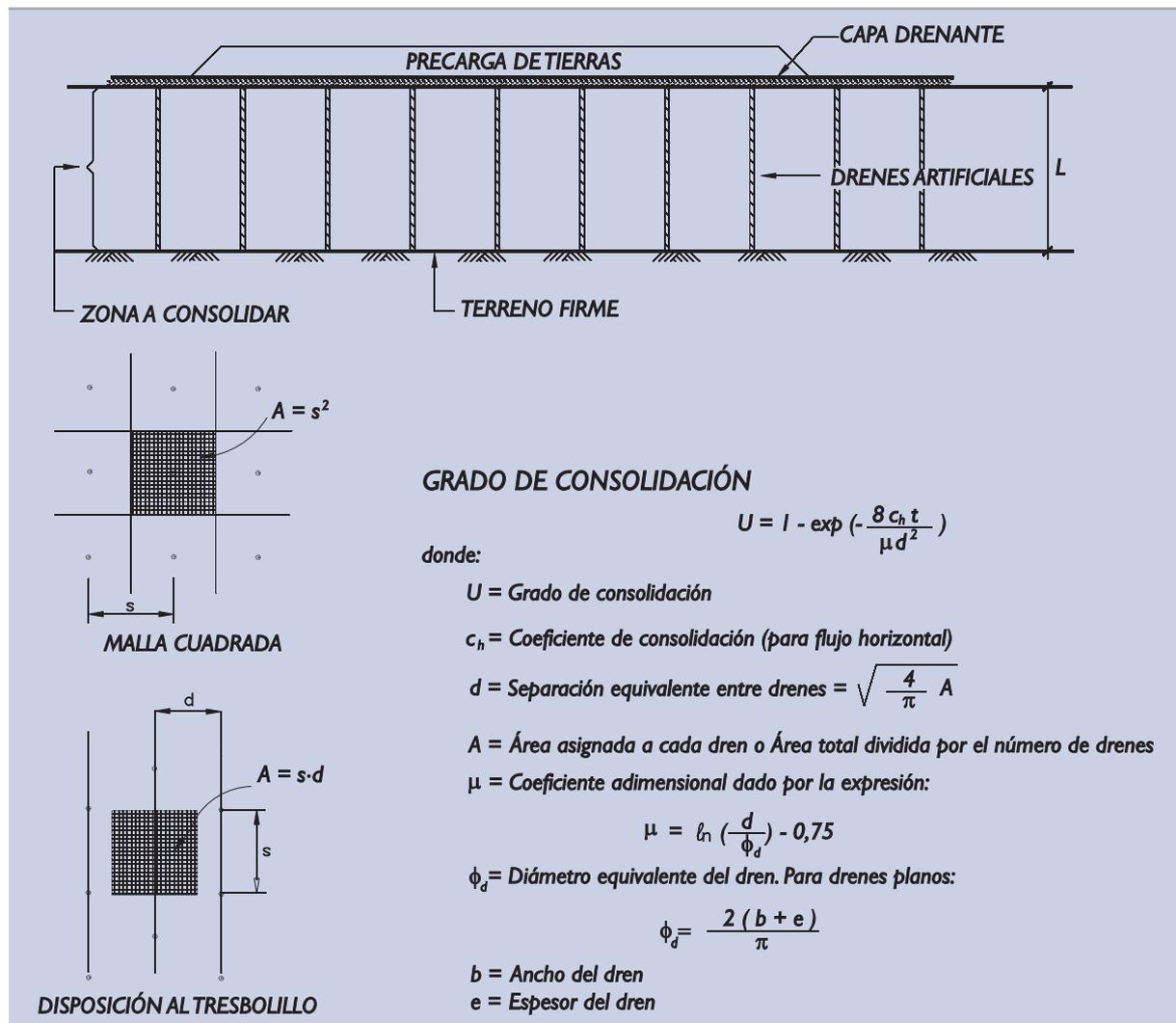
La intensidad de la precarga debe ser tanto mayor cuanto mayor sea el efecto pretendido. El límite superior de la intensidad de la precarga está marcado, aparte de los motivos económicos, por la propia estabilidad del terreno.

Al decidir la intensidad de la precarga (altura de terraplén en el caso usual de precarga con tierras), debe comprobarse que el terraplén creado es estable y que los movimientos que provoca no inducen efectos nocivos en estructuras próximas.

El grado de consolidación alcanzado con una determinada precarga se puede estimar aplicando la teoría de la consolidación unidimensional, cuando no se dispone drenaje artificial suplementario (ver apartado 3.4.8 de esta ROM).

Para el caso particular de precargas verticales sobre estratos horizontales de suelos en los que se dispone un drenaje artificial, se puede calcular el grado de consolidación alcanzado con la fórmula indicada en la Fig. 3.9.1.

Figura 3.9.1. Estimación del grado de consolidación de precargas con drenaje acelerado



Esa expresión analítica u otros cálculos numéricos más complejos pueden permitir la estimación del grado de consolidación alcanzado cuando se mantiene la precarga un cierto tiempo «t» y por lo tanto cuál es, en ese momento, la densidad y la resistencia del terreno.

En ocasiones el proceso de flujo vertical tiene cierta importancia, aunque se dispongan drenes para acelerar la consolidación. Su efecto beneficioso puede contabilizarse calculando, separadamente, el grado de consolidación que se hubiera alcanzado en caso de no existir drenes. Ese cálculo puede hacerse utilizando la teoría de la consolidación unidimensional para flujo vertical que se expone en el apartado 3.4.8.

El grado de consolidación conjunto, U , debido al drenaje radial horizontal y debido al flujo vertical, puede calcularse con la expresión:

$$1 - U = (1 - U_1) (1 - U_2)$$

donde U_1 y U_2 son los grados de consolidación que producirían cada uno de esos dos flujos separadamente.

Es usual y recomendable dejar las sobrecargas hasta que los grados de consolidación alcanzados sean del orden del 75% o mayores. En esas situaciones la retirada total o parcial de las precargas suele producir entumecimientos que son únicamente una pequeña fracción del asiento producido.

En cualquier caso, la determinación del coeficiente de consolidación c_h para flujo horizontal suele ser poco precisa y únicamente la observación detallada del proceso de consolidación puede permitir una cierta evaluación del beneficio obtenido con las precargas en suelos poco permeables.

3.9.2.5 Observación del tratamiento

La observación del tratamiento con precargas es siempre necesaria y debe dirigirse hacia tres aspectos fundamentales:

- ◆ Altura de tierras o intensidad de las cargas, que puede hacerse por procedimientos sencillos. En el caso de tierras, mediante control de su densidad aparente y nivelaciones topográficas.
- ◆ Asientos del terreno, que pueden controlarse mediante placas de asiento colocadas en la superficie del terreno natural. Conviene controlar también asientos a distintas profundidades, bien con extensómetros de suelos colocados verticalmente o mediante tubos telescópicos de medida de asientos.
- ◆ Presiones intersticiales, mediante piezómetros (neumáticos o de cuerda vibrante) introducidos en el terreno a distintas profundidades e intercalados entre los drenes artificiales, a la mayor distancia posible de ellos y con un replanteo cuidadoso de su ubicación exacta.

Estas u otras herramientas permitirán conocer la evolución del proceso de consolidación y decidir el momento en que debe darse por concluida una determinada mejora.

El reconocimiento geotécnico posterior, con procedimientos iguales o similares a los utilizados para reconocer el terreno antes del tratamiento, indicará la mejora obtenida y permitirá proyectar debidamente las estructuras y/o pavimentos a construir sobre el terreno tratado.

3.9.3 Vibración profunda

La vibración de los suelos granulares flojos induce una densificación que mejora su resistencia y disminuye su deformabilidad. Con esa idea se han vibrado, en ocasiones, depósitos arenosos flojos con técnicas muy variadas que se podrían denominar **vibrocompactación**.

En la Fig. 3.9.2 se incluyen, esquemáticamente, dos tipos de vibradores que han sido utilizados con éxito en nuestro país para tratar terrenos arenosos hasta profundidades de unos 15 m. Esa profundidad de tratamiento, o algunos metros más, parece ser el límite práctico de la experiencia actual.

La vibración transmitida al terreno provoca la inestabilidad de su estructura, induciendo una licuefacción parcial y provocando asientos en superficie.

El radio de acción de la vibración depende de la potencia del equipo y del tipo de terreno. En la práctica usual, se suele hacer el tratamiento con una columna de vibrado por cada 3 a 5 m². Con esa densidad se pueden obtener mejoras medias de densidad muy apreciables.

3.9.3.1 Tipos de tratamiento

Para que el terreno se licúe con la vibración es preciso que su contenido en finos (limos más arcillas) sea prácticamente nulo. De otra forma no se produciría la licuefacción. Con contenidos de finos casi nulos (< 5% aprox.), se pueden provocar densificaciones simplemente vibrando los torpedos que se introducen en el terreno. Ese tratamiento se suele denominar **vibroflotación**.

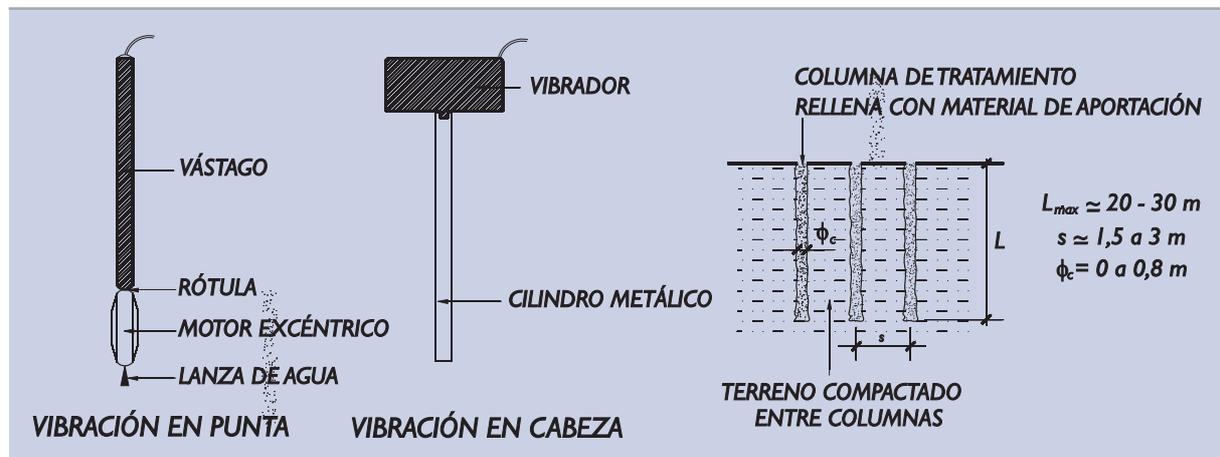
Cuando el contenido en suelos finos aumenta (rango del 5 al 20% aprox.), la vibración del torpedo densifica parcialmente los suelos de alrededor de la vertical en la que se introduce y deja un cilindro hueco, que se va rellenando con un material granular de aportación. Este procedimiento mixto de vibración e inclusión de un material más rígido se suele denominar **vibrosustitución**.

Con contenidos de finos superiores al 20 ó 25% la vibración no ayuda a compactar el suelo circundante y, de utilizarse este procedimiento, resultaría ya un tratamiento de inclusiones rígidas (columnas de grava, por ejemplo), de las que se hablará más adelante.

En cualquier caso estos tratamientos dejan la parte superior del terreno poco compactada. Por eso es necesario un tratamiento final de compactación con rodillos vibrantes en superficie.

En rellenos sumergidos no es fácil recomprimir la superficie del terreno después del tratamiento vibratorio. Esto hace que esta técnica no sea recomendable en esas ocasiones, particularmente si el espesor es reducido. En caso de aplicarse este tratamiento, el procedimiento debe completarse con algún sistema que resuelva el problema apuntado.

Figura 3.9.2. Esquema del tratamiento de vibrocompactación



3.9.3.2 Mejoras alcanzables

Con la vibración profunda se pueden alcanzar densidades relativas altas ($D_r = 75\%$) y resistencias a la penetración dinámica (N del SPT) del orden de $N = 25$ o superior, o resistencias a la penetración estática (q_c del cono holandés) superiores a 10 MPa.

El grado de densificación obtenido puede ser bastante homogéneo y, por lo tanto, esas medidas de densidad pueden diferir poco cuando se hacen a diferentes distancias de las verticales del tratamiento. Dentro de la columna de material de aportación (en el caso de la vibrosustitución) las densidades relativas y las resistencias a la hincia (estática o dinámica) pueden ser mayores.

En depósitos arenosos flojos, es posible mejorar el suelo de manera que se elimine la necesidad de realizar las cimentaciones profundas que en otro caso hubieran sido necesarias. Esto, que en general es cierto para estructuras ligeras, necesita una comprobación especial para el caso de grandes cargas.

En términos generales, la calificación de la aplicabilidad de estos métodos a los distintos tipos de terreno se resume en la Tabla 3.9.2.

Tabla 3.9.2. Aplicabilidad de los tratamientos de vibración profunda a los distintos tipos de terrenos

Tipo de terreno	Vibroflotación	Vibrosustitución
Arenas limpias (*)	Excelente	No es aplicable
Arenas limosas	Regular	Excelente
Fangos	Mala	Buena o regular
Arcillas	No es aplicable	Buena
Rellenos vertidos	Depende del tipo de material	Buena
Vertidos de inertes	No es aplicable	No es aplicable

* Menos del 5% de finos.

3.9.3.3 Procedimientos de control

El control de una mejora de terreno mediante vibración profunda es siempre necesario.

Antes de proyectar el tratamiento se debe conocer con detalle el terreno. El proyecto del tratamiento debe incluir un pronóstico detallado de la mejora que se pretende obtener. Ese pronóstico debe expresarse en términos de la variación esperada de los parámetros más representativos (densidad relativa, índice N del SPT, resistencia a la penetración estática, etc.).

La mejora que se puede obtener puede conocerse en función de experiencias previas. En el apartado anterior se han indicado algunos valores típicos de arenas mejoradas por vibración profunda.

La realización de un tratamiento de vibración profunda, sea con o sin material de aporte, exige un control geométrico (puntos de tratamiento y nivelación superficial), así como de los consumos de material de aportación.

Para evaluar la eficacia del tratamiento, deben repetirse los ensayos de reconocimiento geotécnico realizados antes del tratamiento. Son especialmente indicados en estos casos los ensayos SPT, los ensayos de penetración dinámica continuos y los ensayos de penetración estática.

Los ensayos geofísicos y particularmente los ensayos de sísmica de refracción realizados en sondeos (cross-hole o sus variantes) pueden resultar útiles en la investigación de la mejora del terreno.

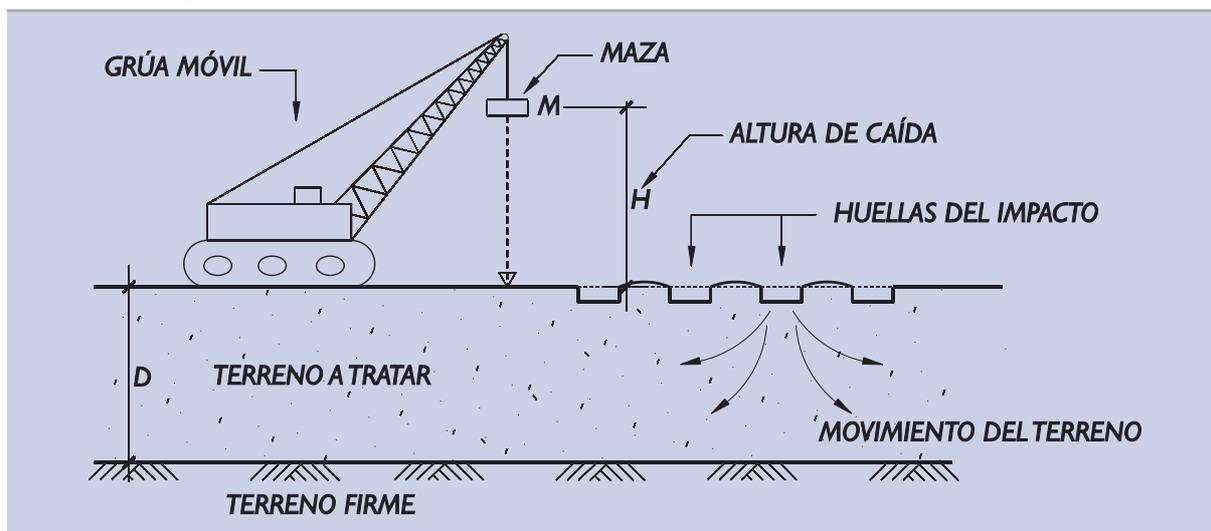
La evaluación de la capacidad de carga y la estimación de módulos de deformación pueden requerir la realización de ensayos de carga "in situ", ya sea mediante placas de carga en calicatas más o menos profundas o mediante ensayos presiométricos en sondeos.

La experiencia indica que el paso del tiempo, después de finalizado el tratamiento, aumenta, en general, la resistencia del terreno y disminuye su deformabilidad. Por eso los reconocimientos geotécnicos de evaluación de la mejora realizados inmediatamente después del tratamiento de vibración pueden conducir a conclusiones pesimistas. Investigaciones hechas unos meses después de finalizar el tratamiento pueden aportar una idea más precisa del beneficio obtenido.

3.9.4 Compactación dinámica

La caída de grandes pesos desde gran altura provoca la rotura del suelo y su desplazamiento hacia los lados de la zona de impacto. A mayores profundidades, se puede producir también una mejora debido a la onda de presión que afecta a los granos del suelo y modifica sus uniones hacia una configuración más densa. Ver esquema de la Fig. 3.9.3.

Figura 3.9.3. Esquema de la compactación dinámica



El tratamiento superficial de suelos de esta forma se ha llevado a cabo con mazas de entre 1 t y más de 100 t y con alturas de caída de hasta 40 m.

El espaciamiento usual entre puntos de impacto suele estar comprendido entre los 2 ó 3 m para las mazas pequeñas y más de 10 m para las mazas pesadas.

El tratamiento suele realizarse en varias pasadas, ejecutando, en cada una de ellas, puntos de caída alternados en la malla final del tratamiento proyectado.

La profundidad de la zona densificada está relacionada con la energía del golpe. La experiencia indica que esa profundidad está dada por la fórmula empírica:

$$D = \alpha \cdot \sqrt{M \cdot H}$$

donde:

M = masa de la maza (t).

H = altura de caída (m).

D = profundidad efectiva del tratamiento (m).

α = factor dependiente del tipo de terreno y de las características del tratamiento. El valor usual es próximo a $0,5 (m/t)^{1/2}$. La presencia de un fondo rígido puede aumentar el valor de α .

Si existe, a una profundidad menor que D, un estrato rígido, se tomará como valor de D esa profundidad menor.

Una vez que se eligen la masa de la maza y la altura de caída de manera que se pueda alcanzar una profundidad de tratamiento acorde con el problema que se quiere resolver, se debe decidir la intensidad del tratamiento, esto es el número de golpes de maza y su distribución espacial y temporal.

A estos efectos, conviene definir un parámetro de referencia que se denomina energía específica o energía aplicada por unidad de volumen de suelo tratado, que sería la siguiente:

$$E_s = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^N \cdot \frac{M V_i^2}{A D}$$

donde:

- E_s = energía específica.
- N = número total de golpes.
- M = masa de la maza.
- V_i = velocidad de impacto.
- A = área total en planta de la superficie tratada.
- D = profundidad efectiva del tratamiento.

Existe una correlación entre la energía específica aplicada y el aumento medio de la densidad seca del terreno tratado. Pero esa relación depende mucho del tipo de terreno. Para suelos arenosos saturados se puede suponer que el aumento medio de densidad seca viene expresado por la siguiente relación:

$$\Delta \gamma_d (\%) = \eta \cdot E_s^{1/2}$$

donde:

- $\Delta \gamma_d (\%)$ = aumento medio de la densidad seca expresado en tanto por ciento de la densidad seca existente antes del tratamiento.
- E_s = energía específica.
- η = constante cuyo valor típico es del orden de $0,2 \text{ kPa}^{-1/2}$.

Una forma de verificar en obra que se consigue el aumento deseado de densidad seca es el control del asiento de superficie, s , pues, de acuerdo con las definiciones hechas, se cumple:

$$\Delta \gamma_d (\%) = 100 \frac{s}{D}$$

siendo:

- s = asiento medio de la superficie del terreno, provocado por el tratamiento.
- D = profundidad efectiva del tratamiento.

Las energías específicas de tratamientos usuales oscilan desde unos pocos cientos de kPa, en zonas de suelos blandos con poco espesor, hasta energía específica de varios miles de kPa en tratamientos de grandes espesores de suelos.

El número total de golpes N se suele aplicar en varias fases (usualmente dos o tres) utilizando puntos de caída dispuestos en planta según una malla rectangular o triangular con un punto de impacto cada 10 m^2 (aprox.). En cada fase se golpea en el mismo punto varias veces seguidas (cuatro golpes es un número usual) y, al cambiar de fase, se cambia de puntos de golpes para intercalarlos entre los precedentes. Es conveniente establecer cierto plazo de espera entre dos fases consecutivas para facilitar la consolidación del terreno.

Después de la compactación dinámica, la superficie del terreno queda muy irregular. Puede ser preciso un trabajo posterior de regularización y compactación superficial, realizado con otros procedimientos.

Esta técnica se ha utilizado con éxito tanto en terrenos granulares como cohesivos blandos (en estos últimos los resultados son menos seguros) y parece particularmente indicada en el tratamiento de rellenos artificiales de naturaleza heterogénea, que son difícilmente mejorables con otros procedimientos.

Este tratamiento puede hacerse también bajo el agua (con ciertas formas hidrodinámicas de las pesas).

La compactación dinámica puede hacerse con carácter local para mejorar la zona de apoyo de cimentaciones individuales.

El efecto nocivo en las estructuras próximas (y el ruido) han de vigilarse, ya que la vibración producida en el terreno circundante puede ser importante, igual que ocurre con la hincas de grandes pilotes.

La evaluación de la eficacia del tratamiento requiere, como en las otras técnicas, un reconocimiento geotécnico posterior al tratamiento de mejora.

3.9.5 Compactación con explosivos

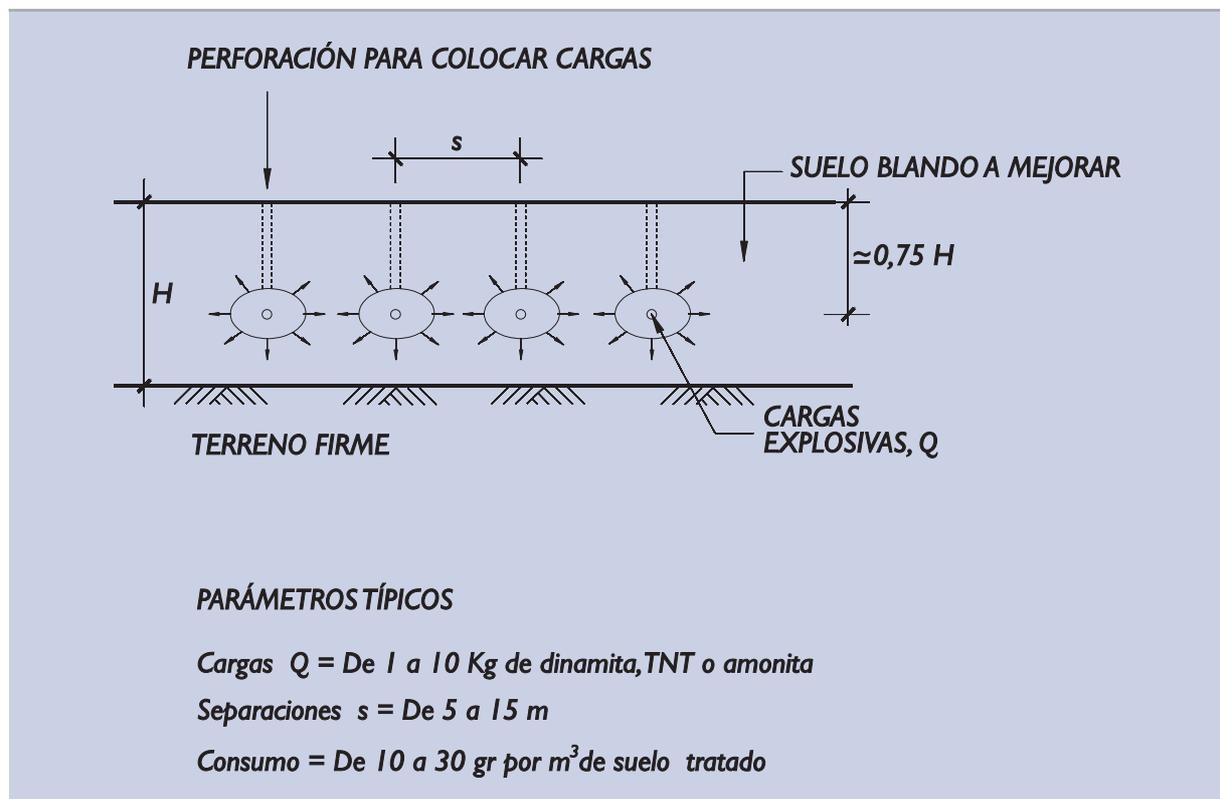
La explosión de cargas explosivas en el interior del terreno provoca la rotura en el entorno de la carga, el desplazamiento transitorio del terreno próximo y la vuelta hacia una situación posterior en general más estable y más densa.

La técnica ha sido utilizada en obras portuarias para desplazar fangos existentes bajo rellenos de mejor calidad y para compactar rellenos vertidos.

En depósitos de arenas finas, se puede provocar la licuefacción y conseguir aumentos de densidad posteriores importantes. En algunos tratamientos se han medido asientos superficiales de más de medio metro.

Normalmente, las cargas explosivas se colocan mediante perforaciones y se alojan a profundidades próximas al centro de la zona a densificar o algo más bajas. Ver Fig. 3.9.4.

Figura 3.9.4. Esquema del tratamiento con explosivos



En esa figura se indican algunos parámetros típicos de consumos y espaciamiento de cargas propios de suelos granulares. El tratamiento de otro tipo de suelos puede requerir mayores energías.

El control de vibraciones inducidas en estructuras próximas es necesario, ya que este tipo de tratamientos puede producir daños a distancias considerables de la zona de explosión.

La evaluación final del resultado obtenido puede y debe hacerse mediante la medición de los asentamientos alcanzados y repitiendo las prospecciones geotécnicas previas al tratamiento encaminadas a la determinación de la compacidad del terreno tratado.

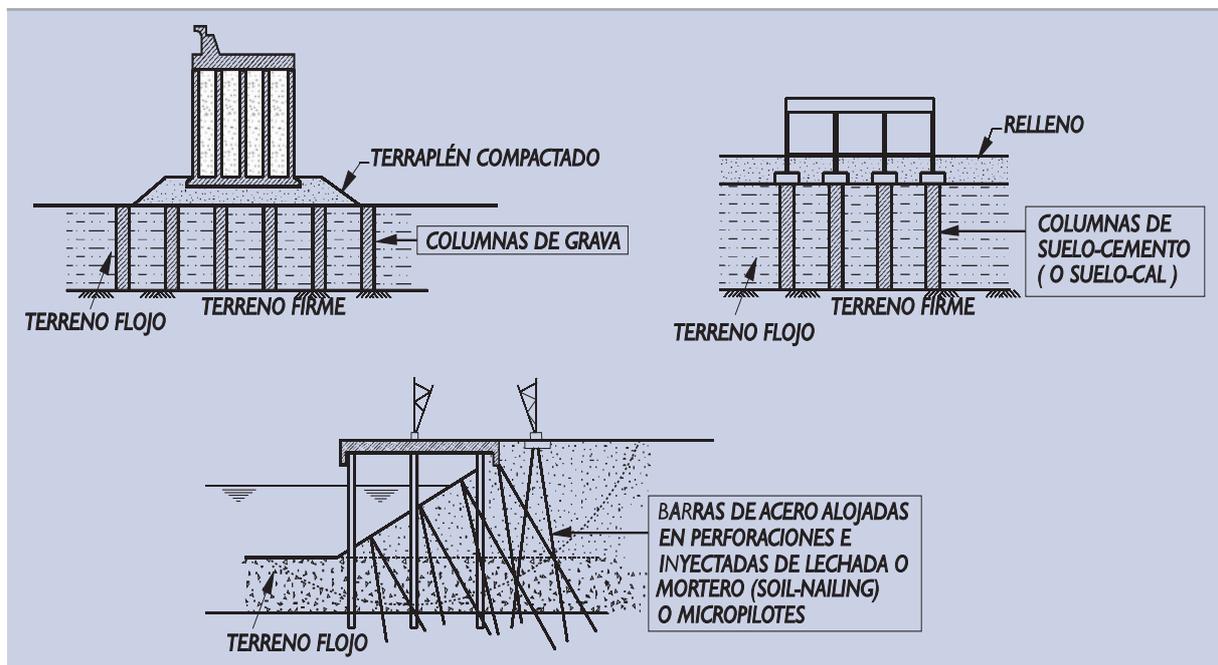
3.9.6 Inclusiones rígidas

La mejora del terreno mediante inclusiones rígidas es una técnica que puede ser considerada, más que como mejora, como técnica de ejecución de elementos de cimentación.

El tratamiento práctico que se da normalmente a este tipo de soluciones tiene sin embargo cierta similitud con el de otras técnicas de tratamiento de mejora del terreno, bien sea porque al terreno con inclusiones se lo considera como un medio homogéneo, con unas propiedades equivalentes mejoradas, o bien porque el propio suelo forma parte de la inclusión rígida. Desde ese punto de vista, a estas soluciones se las puede considerar como procedimientos de mejora.

Las inclusiones rígidas más usuales se ilustran en la Fig. 3.9.5 y son:

Figura 3.9.5. Esquemas de algunos tratamientos de mejora mediante inclusiones rígidas



- ◆ Las columnas de grava, ejecutadas con las técnicas de vibrosustitución o con técnicas específicas.
- ◆ Las columnas de suelo-cemento o suelo-cal que se suelen ejecutar con hélices que se hincan y remueven el suelo natural y lo mezclan con la cal o el cemento. También pueden utilizarse otros materiales aglomerantes.

- ◆ Las barras de acero alojadas en perforaciones e inyectadas con lechada de cemento (soil nailing) o en grupos de varias barras o tubos de acero alojados en perforaciones que se rellenan con lechada de cemento o mortero (micropilotes). El refuerzo del terreno con pilotes de madera (eucaliptus, principalmente) es una práctica habitual en zonas fangosas o de marisma.

Dentro de este tipo de refuerzo cabría también considerar las estructuras de tierra-armada bien sea con flejes metálicos, con geomallas o con otros productos artificiales.

De cada uno de estos tipos de tratamiento se tiene una experiencia ya amplia y existen procedimientos de proyecto específico que permiten dimensionar adecuadamente los refuerzos requeridos en cada circunstancia.

En general, comparados con los procedimientos de mejora antes citados (precargas, vibrocompactación, compactación dinámica y compactación con explosivos), estos otros métodos de inclusiones rígidas suelen ser de mayor coste, aunque éste puede ser menor que otros sistemas equivalentes de cimentación profunda.

3.9.6.1 Dimensionamiento de las inclusiones

Las inclusiones rígidas formadas por columnas de suelo-cemento o suelo-cal o por elementos similares a los pilotes convencionales (barras o tubos de acero, madera, etc.) deben analizarse como si se tratasen de pilotes pues su rigidez será, en general, mucho mayor que la del suelo circundante no tratado.

Las columnas de grava, sin embargo, tienen una rigidez que se debe principalmente al confinamiento lateral que produce el propio suelo que se quiere reforzar. Como consecuencia pueden resultar más flexibles que otro tipo de inclusiones. El reparto de cargas entre el suelo y las columnas puede realizarse siguiendo los siguientes pasos:

- a. En primer lugar ha de estimarse el asiento que experimentaría la superficie externa del terreno natural en caso de no realizarse ningún tratamiento y debido al espesor de terreno H donde se insertarán las columnas. Ese asiento se denominará s_0 .
- b. En segundo lugar se supondrán unas determinadas características del tratamiento. Los parámetros que deben definirse son:
 - ◆ Diámetro de las columnas y su profundidad, D y H .
 - ◆ Ángulo de rozamiento de las gravas ϕ .
 - ◆ Separación de las columnas de grava, asignando a cada columna un área de afección en planta A .

Con estos datos se puede definir el número adimensional " ρ " que mide el volumen de suelo que ocupan las columnas respecto al total de suelo tratado en esa profundidad H .

$$\rho = \frac{\pi \cdot D^2}{4A}$$

- c. Cálculo del asiento con columnas de grava.

El hecho de construir las columnas de grava reduce el asiento s_0 antes calculado al asiento estimado:

$$s = \alpha s_0$$

Por vía empírica y basándose en mediciones realizadas en actuaciones de mejora de este tipo, se ha llegado a relacionar α y ρ con el siguiente baremo.

Correlación aproximada entre α y ρ					
Valores de ρ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Valores aproximados de α	0,8	0,65	0,47	0,35	0,25

- d. Normalmente las columnas de grava se construyen para aumentar la capacidad portante del terreno. De otra forma, si se utilizaran únicamente para reducir asentamientos, no tendrían una ventaja clara sobre otros procedimientos más simples.

Para estimar la resistencia del terreno después de colocar las columnas de grava es preciso conocer la tensión vertical que actúa sobre cada columna σ_v , que es mayor que la tensión vertical, p , que actúa sobre el suelo natural en caso de no existir columnas de grava. Al ser la columna algo más rígida que el terreno natural, el cociente σ_v/p es mayor que la unidad y se denomina aquí β .

Los valores ⁽¹⁹⁾ de β dependen fundamentalmente de ρ y son típicos los siguientes:

Correlación aproximada entre β y ρ					
Valores de ρ	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Valores de β	2,8	2,4	2,2	2,0	1,7

- e. Para cálculos de estabilidad sin drenaje en el suelo natural (si hubiese necesidad de realizarlos), se puede suponer que el conjunto del terreno (suelo natural y columnas) equivale a un terreno homogéneo con los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \text{Peso} & \quad \gamma = \gamma_1 (1-\rho) + \gamma_2 \cdot \rho \\ \text{Cohesión} & \quad c = s_u (1-\rho) \\ \text{Rozamiento} & \quad \text{tg } \phi = \beta \cdot \rho \cdot \text{tg } \phi_g \end{aligned}$$

Cuando se ejecutan columnas de grava ubicadas en planta fuera de la zona cargada, el ángulo de rozamiento equivalente del conjunto es claramente menor. Debe suponerse, en esa zona:

$$\text{tg } \phi = \rho \text{ tg } \phi_g \quad (\text{fuera de la zona de carga})$$

La resistencia al corte sin drenaje del suelo natural es s_u . El valor que debe usarse es el que corresponde a la situación de cálculo correspondiente. A veces se establecen plazos de espera para aplicar las cargas y conseguir cierto aumento de s_u .

- f. Para cálculos en condiciones con drenaje se deben utilizar los siguientes parámetros geotécnicos equivalentes para todo el conjunto.

$$\begin{aligned} \text{Peso} & \quad \gamma = \gamma_1 (1-\rho) + \gamma_2 \cdot \rho \\ \text{Cohesión} & \quad c = c' (1-\rho) \\ \text{Rozamiento} & \quad \text{tg } \phi = \alpha (1-\rho) \text{ tg } \phi'_s + [\beta \cdot \rho] \text{tg } \phi_g \end{aligned}$$

(19) Cuando se supone que la presencia de las columnas disminuye el asiento s_0 al valor $\alpha \cdot s_0$, se puede pensar que la carga que actúa sobre el suelo disminuye del valor p al valor $\alpha \cdot p$.

El equilibrio vertical se puede establecer sumando la carga que actúa por unidad de área sobre las columnas ($\beta \cdot p \cdot \rho$) y sobre el suelo $\alpha \cdot p (1 - \rho)$ e igualar la suma a la carga p . Con esto se obtiene:

$$\beta \cdot \rho + \alpha (1 - \rho) = 1$$

Como consecuencia, el valor de β puede estimarse una vez que α y ρ son conocidos.

Para las zonas de tratamiento que queden fuera de la vertical de la zona de carga el rozamiento será:

$$\text{Rozamiento (fuera de la zona de carga): } \operatorname{tg} \phi = (1-\rho) \operatorname{tg} \phi'_s + \rho \operatorname{tg} \phi_g$$

Las densidades equivalentes γ , del suelo γ_1 y de las gravas γ_2 , consignadas en e) y f), serán las correspondientes a los valores aparentes, por encima del nivel freático. Para puntos situados por debajo del nivel freático, esos valores son los correspondientes al estado sumergido ($\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$) de cada material.

Los parámetros resistentes del suelo natural en presiones efectivas se han denominado con las letras c' (cohesión efectiva), que normalmente se tomará igual a cero en los suelos blandos no preconsolidados, y ϕ'_s , que es el ángulo de rozamiento efectivo.

El ángulo de rozamiento ϕ_g es el que corresponde al material que conforma las columnas.

3.9.7 Inyecciones

La técnica de las inyecciones es especialmente útil en la reducción de la permeabilidad del terreno, aunque también pueden utilizarse para otros fines, entre ellos reforzar su resistencia y disminuir su deformabilidad.

Las inyecciones son especialmente útiles en el tratamiento de filtraciones hacia los sistemas de achique de diques secos con solera drenada, ya que pueden reducir notablemente los caudales de bombeo necesarios para mantener en seco el dique.

Las técnicas de inyección más usuales se recogen en el esquema de la Fig. 3.9.6. Los efectos que se consiguen con ellas se indican a continuación.

3.9.7.1 Inyecciones de impregnación

La técnica más adecuada para reducir la permeabilidad del terreno consiste en forzar la entrada de lechadas de cemento y agua (con ciertas adiciones de bentonita y otros aditivos) a través de los poros del suelo.

Estas lechadas se han hecho circular con presiones moderadas, sin llegar a romper el suelo, a través de suelos granulares que sean ampliamente permeables ($K > 10^{-1}$ cm/s, aprox.).

Utilizando cementos especialmente finos (microcemento) se han llegado a rellenar de lechada los poros de arenas más finas ($K = 10^{-1}$ a 10^{-2} cm/s).

Para suelos aún más finos ($K = 10^{-2}$ a 10^{-4} cm/s) se puede inyectar, sin romper el suelo, otros productos (silicatos, resinas, etc) de mayor poder de penetración.

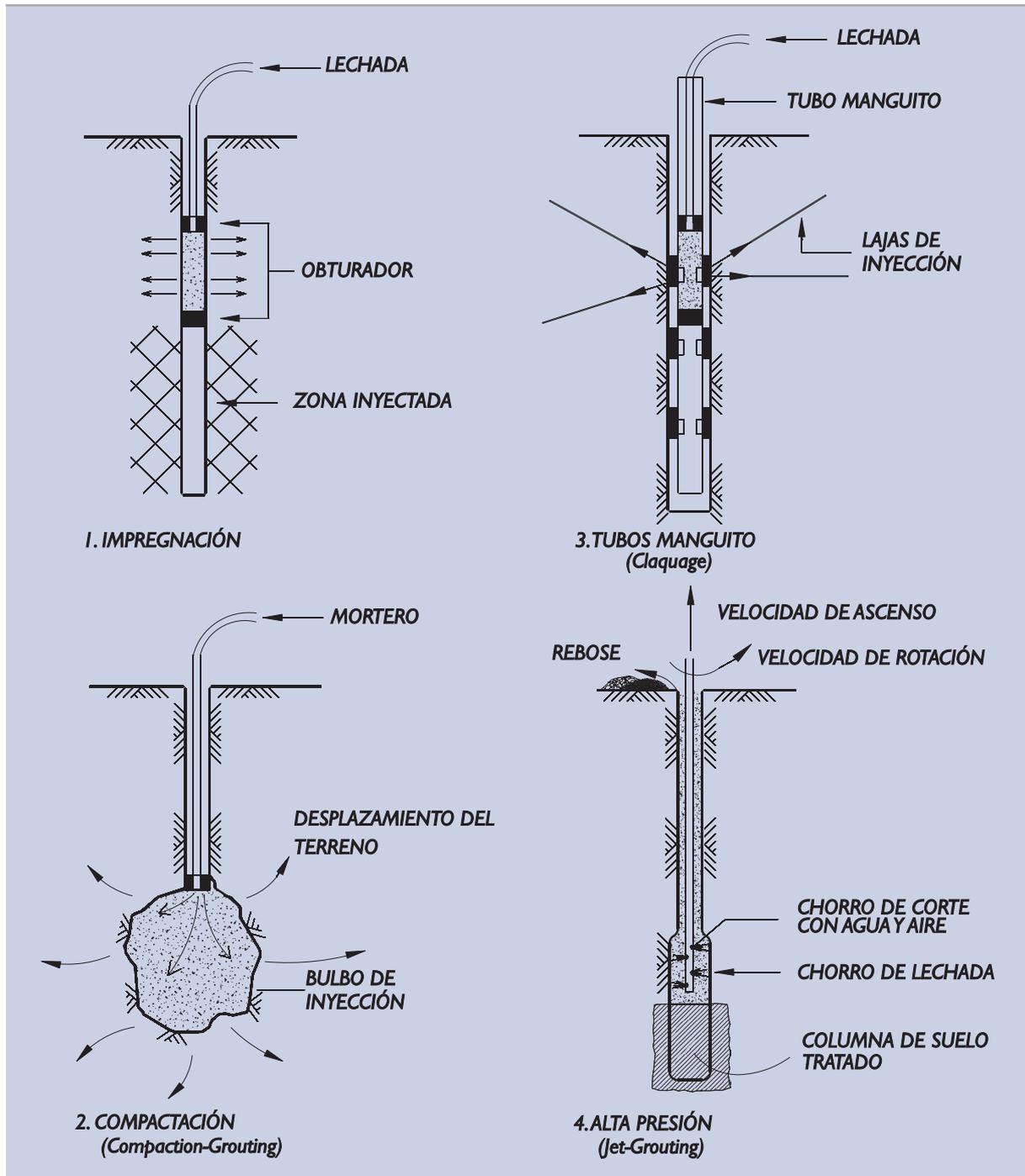
Las inyecciones se suelen realizar con espaciamientos cortos (de 1 a 3 m) si se quiere conseguir cierta estanqueidad. La permeabilidad de los terrenos tratados puede resultar bastante baja, del orden de 10^{-5} cm/s o inferior.

La resistencia del terreno y su deformabilidad también quedan mejoradas con estos tratamientos de inyecciones de impregnación. Su eficacia debe investigarse en cada aplicación concreta.

3.9.7.2 Inyecciones de compactación (Compaction-Grouting)

Esta técnica consiste en forzar un mortero de cemento y arena espeso en el fondo de un taladro vertical obligando al terreno a desplazarse y reducir su volumen.

Figura 3.9.6. Esquemas de algunos tipos de inyección usuales



Esta técnica ha sido utilizada con éxito para compensar, con levantamientos del terreno, los asientos producidos por otras causas.

3.9.7.3 Inyecciones con tubos manguito (Clauquage)

La inyección de lechada de cemento según esta técnica se realiza a través de un tubo que tiene orificios regularmente espaciados y protegidos por el exterior mediante unos manguitos flexibles.

La inyección se hace por tramos, introduciendo lechada para que salga por uno o varios manguitos. Al aislar un tramo de tubo y forzar dentro de él la presión de la lechada, el manguito cede y la lechada sale al exterior, rompiendo el suelo según planos que pueden tener diversas orientaciones en función de su estado tensional.

Las presiones que se utilizan para provocar la rotura (claquage) suelen ser de varias decenas de bares. Para mantener el caudal de inyección, después de provocada la rotura, se utilizan presiones más moderadas, del orden de diez bares o inferiores.

Con esas presiones, la inyección recorre las grietas abiertas y comprime el suelo. Como resultado, el terreno queda reforzado con una serie de lajas de inyección.

Esta técnica se ha aplicado con éxito en operaciones de recalce de edificios cimentados en losa. Con esa tipología de cimentación se pueden producir levantamientos controlados.

3.9.7.4 Inyecciones de alta presión (Jet-Grouting)

El jet-grouting es una técnica destinada a tratamiento de suelos en profundidad para formar zonas de suelo mejorado o para sustituir el suelo por otros productos.

El útil principal del jet-grouting es una tubería con orificios pequeños (toberas) que permite formar chorros fluidos (jets) con velocidades muy altas y caudales de algunos litros por segundo.

El jet (o chorro) de corte del terreno puede estar formado por una lechada de cemento (Jet I), o por una lechada de cemento envuelta en un chorro de aire (Jet II), o bien por un chorro de agua envuelto en un chorro de aire. En este último caso, la lechada se inyecta a través de otras toberas suplementarias (Jet III).

Recientemente se utilizan dardos especialmente potentes para realizar columnas de gran tamaño; la técnica correspondiente se conoce con el nombre "superjet".

El tratamiento del terreno se realiza de abajo a arriba. Primero se introduce el útil de la inyección hasta la profundidad deseada mediante una perforación previa y después se extrae a la velocidad conveniente rompiendo el suelo y mezclándolo con la lechada. La cantidad de lechada a mezclar con el suelo se puede controlar mediante la velocidad de extracción del útil de jet-grouting.

Con este procedimiento se pueden obtener columnas (girando el chorro de corte) o pantallas planas de lechada o mortero o de estos materiales mezclados con el suelo.

Su utilización en problemas de diversa índole está muy extendida, dada la versatilidad y rapidez con que pueden realizarse los tratamientos.

Con esta técnica se consiguen columnas de suelo tratado de hasta 3 m de diámetro (las mayores, en suelos granulares) y con resistencias tan altas como las de los hormigones (las más elevadas, en suelos granulares).

El control del producto obtenido es difícil y requiere reconocimientos complicados, ensayos de laboratorio, pruebas de ejecución previas e incluso ensayos de carga finales.

El procedimiento es aplicable a cualquier tipo de terreno, excepto en los excesivamente permeables (escolleros o gravas muy limpias), en los que es preciso un tratamiento de cierre previo al jet-grouting. En suelos con materia orgánica pueden existir dificultades para el fraguado del conjunto lechada-terreno.

3.9.8 Otros procedimientos

Sólo al objeto de completar la mención de las distintas técnicas de tratamiento del terreno, deben citarse las siguientes:

Electroósmosis

La introducción de barras de acero o de aluminio como ánodos dentro del terreno y la de tubos de well-point como cátodos, en disposición y con espaciamiento similar al descrito para los drenes de las precargas (apartado 3.9.2), origina en el terreno un flujo de agua hacia los cátodos cuando se establece, entre ánodos y cátodos, una corriente continua.

El procedimiento puede completarse con aportes químicos (silicatos por ejemplo) que son arrastrados por el agua y retenidos por el terreno en su curso hacia los cátodos.

Esta técnica permite acelerar la consolidación de masas de suelo y su refuerzo con inyecciones químicas y, aunque es muy sugerente y tiene una teoría bien desarrollada, su aplicación práctica está limitada debido al alto consumo de energía.

Tratamientos térmicos

Los terrenos blandos y húmedos pueden desecarse para que ganen resistencia mediante la combustión de gasóleo u otros combustibles en pozos o sondeos practicados previamente en el terreno.

Esta técnica, que se sepa, no ha sido aún aplicada en España. El coste energético es muy elevado.

La generación de bajas temperaturas mediante nieve carbónica (CO_2), o mediante la expansión de nitrógeno líquido en circuitos cerrados a través de tuberías dentro del terreno, o en circuitos abiertos en perforaciones previas, permite congelar el terreno dotándole de una gran resistencia temporal, que permite realizar ciertas labores de contención en excavaciones. La técnica, de coste elevado, se ha utilizado con éxito en varias obras en nuestro país.

3.10 EFECTOS DINÁMICOS

3.10.1 Consideraciones generales

Algunas acciones climáticas como las producidas por las oscilaciones del mar o el viento, los movimientos sísmicos, las acciones debidas a la operatividad del buque, entre otras causas, hacen que el terreno pueda quedar solicitado por tensiones variables de tipo cíclico o impulsivo, cuyo valor depende de complejos fenómenos de interacción o de respuesta dinámica conjunta de las estructuras y del terreno de apoyo al ser solicitados por dichas acciones.

Los efectos dinámicos en las obras marítimas y portuarias pueden ser especialmente importantes. Por ejemplo, los esfuerzos sobre los diques de abrigo verticales producidos por la acción del oleaje pueden amplificarse dependiendo de las características dinámicas del dique y de su cimientto.

El comportamiento del terreno frente a las acciones dinámicas tiene unos rasgos típicos que el ingeniero debe conocer. Los procedimientos de ensayo para la determinación de los parámetros del terreno que se deben utilizar en los estudios dinámicos así como los procesos de caracterización del terreno son diferentes, en algunos aspectos, a los correspondientes a condiciones estáticas.

La diferencia principal que se observa al considerar el comportamiento del suelo frente a sollicitaciones de carácter cíclico o alternativo es la generación de presiones intersticiales en algunos suelos saturados. En procesos de carga monótonos la presión intersticial crece de acuerdo con ciertas leyes. En un ciclo de carga-descarga la presión intersticial puede ser diferente en la fase de carga que en la de descarga y, como consecuencia, aunque la presión total añadida sea nula al final del ciclo, puede quedar una presión intersticial remanente. Nuevos ciclos de carga-descarga pueden provocar sucesivos incrementos de presión intersticial que, en caso de no drenarse, podrían debilitar la capacidad de carga o capacidad resistente del terreno.

Otro aspecto esencial que se observa en el comportamiento del terreno frente a cargas alternativas es la capacidad de disipación de energía. Esta cualidad, conocida como amortiguamiento, es de tipo histerético, dentro de un amplio rango de frecuencias de excitación (1 a 10 Hz, por ejemplo).

A su vez, la capacidad resistente de los suelos sometidos a cargas cíclicas depende, no sólo del nivel y grado de variación de las tensiones producidas, sino también de la capacidad de drenaje del suelo. Por esta causa pueden producirse en algunos suelos aumentos transitorios de las presiones intersticiales y, consiguientemente, reducciones de la capacidad resistente del suelo. En suelos granulares dilatantes este fenómeno puede ser inverso, dando lugar a una disminución de las presiones intersticiales y, consiguientemente, a aumentos de la capacidad resistente del suelo.

Frente a la actuación de cargas cíclicas puede considerarse que un suelo saturado se comporta en condiciones drenadas, parcialmente drenadas o no drenadas dependiendo del grado de similitud entre la escala de tiempos necesarios para la completa consolidación del suelo ante la actuación de la carga ($t_{U(100\%)}$) (es decir, para drenar el exceso de presión intersticial) y la de separación entre ciclos de la carga (t_c), equivalente al semiperíodo de la misma ($t_c = T/2$) o a la duración de una carga impulsiva.

De esta forma, si:

- ◆ $t_{U(100\%)} \ll t_c$ puede considerarse que la acción, a los efectos del comportamiento del suelo, es estática y que éste se encuentra en condiciones totalmente drenadas.
- ◆ $t_{U(100\%)} \approx t_c$ puede considerarse que la acción, a los efectos del comportamiento del suelo, es cíclica y que éste se encuentra en condiciones parcialmente drenadas.
- ◆ $t_{U(100\%)} \gg t_c$ puede considerarse que la acción, a los efectos del comportamiento del suelo, es cíclica y que éste se encuentra en condiciones no drenadas

A estos efectos, de acuerdo con lo señalado en el apartado 3.4.8 de esta Recomendación, puede aproximarse el valor de $t_{U(100\%)}$ por:

$$t_{U(100\%)} = H^2/c_v$$

siendo H la distancia más larga hasta el drenaje, es decir, el espesor del estrato menos permeable si este drena por una cara o la mitad si drena por ambas, o, si resultase menor que el espesor mencionado, la mitad del ancho de cimentación cuando la carga se transmite a través de una estructura monolítica; y c_v el coeficiente de consolidación del suelo.

De esta forma, el comportamiento del suelo frente a la acción del oleaje en condiciones de no rotura (período T en el rango entre 5 y 20 s) será en general en condiciones no drenadas para suelos saturados, tanto cohesivos como granulares finos. Las arenas medias podrán considerarse en condiciones parcialmente drenadas y las arenas gruesas, gravas y escolleras en condiciones drenadas.

Por otra parte, el comportamiento del suelo frente a la acción del oleaje en condiciones de rotura, a las acciones impulsivas producidas por el oleaje en estructuras monolíticas (t_c en el rango entre 0,01 y 0,05 s) o del sismo (t_c en el rango entre 0,05 s y 0,5 s) será en general en condiciones no drenadas para la mayoría de suelos y algunos rellenos de todo-uno.

Para estudiar el comportamiento del terreno frente a las solicitaciones de carga alternativas o cíclicas o para el estudio de problemas de interacción suelo-estructura, el ingeniero deberá examinar en primer lugar el tipo de drenaje esperado. El procedimiento de análisis más adecuado, que después habrá de proseguirse, depende de las condiciones de drenaje.

3.10.2 Comportamiento dinámico sin drenaje

El comportamiento de los suelos en laboratorio, y presumiblemente también en el campo, sometidos a ciclos de carga uniformes y sin permitir el drenaje, puede representarse mediante un modelo elástico lineal viscoso

equivalente donde, además, se impone cierto crecimiento de las presiones intersticiales dependiente del número de ciclos y de su intensidad. Los parámetros de uso más frecuentes y los ensayos de laboratorio que suelen realizarse para determinarlos son los que se indican a continuación.

3.10.2.1 Generación de presiones intersticiales

Cuando no existe drenaje, los ciclos de carga generan presiones intersticiales que pueden ajustarse, en general, mediante una expresión del siguiente tipo:

$$\frac{n}{N} = \left[\frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(\pi \frac{u_n}{\sigma'_{vo}} \right) \right) \right]^\theta$$

donde

- n = número de ciclos de carga realizados.
- N = número de ciclos de carga que han de realizarse para alcanzar la rotura.
- u_n = presión intersticial acumulada al final del ciclo número n .
- σ'_{vo} = presión efectiva vertical al comienzo del ensayo.
- θ = parámetro del modelo. Un valor típico es $\theta = 0,7$.

Los ensayos de laboratorio permiten, para un determinado suelo y un determinado tipo de carga cíclica, determinar los valores de N y θ , que son los parámetros de este modelo.

Superpuesta a esa ley de generación de presiones residuales al final del ciclo, durante cada ciclo se produce un cambio de presión intersticial:

$$\Delta u = \pm B \left(|\Delta \sigma_{oct}| + a |\Delta \tau_{oct}| \right)$$

siendo $\Delta \sigma_{oct}$ y $\Delta \tau_{oct}$ los cambios cíclicos de las tensiones octaédricas y a y B parámetros a determinar. Para suelos elásticos saturados se cumple que $B = 1$ y $a = 0$. En general B y a han de medirse en laboratorio y pueden resultar dependientes del número de ciclos previos.

Existen muchas otras expresiones numéricas que pueden representar la variación de presiones intersticiales durante estos procesos de carga-descarga. Por ese motivo, el ingeniero debe consultar la literatura técnica especializada.

El conocimiento de las presiones intersticiales generadas por la acción del oleaje u otras oscilaciones del mar, así como por el sismo, en condiciones no drenadas es de particular importancia para la verificación de la estabilidad de muchas estructuras portuarias (diques en talud, banquetas de cimentación de diques verticales...). Para resolver este problema no existen soluciones tabuladas o fórmulas analíticas sencillas generales, debiéndose recurrir para cada caso a la literatura técnica especializada o a la utilización de modelos. Para algunos casos concretos, en esta ROM se recogen soluciones aproximadas en el apartado 3.4.11 en lo que respecta a las presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del mar, y en el apartado 3.10.4 en lo que respecta al sismo.

En muchas ocasiones, el cálculo geotécnico dinámico de las situaciones sin drenaje se realiza en presiones totales. En esos casos la definición del proceso de generación de presiones intersticiales puede obviarse.

3.10.2.2 Resistencia dinámica sin drenaje

La forma de caracterizar la resistencia dinámica de los suelos es, en general, mediante los parámetros de resistencia al corte definidos en condiciones estáticas y en término de presiones efectivas añadiendo a esa defi-

nición la ley de crecimiento de las presiones intersticiales que generan las alternancias de la carga. En general, todos los terrenos pueden suponerse con iguales parámetros efectivos de resistencia al corte en condiciones dinámicas que en las estáticas.

Generalmente, los esfuerzos de corte alternativos no generan presiones intersticiales importantes, excepto en las arenas finas saturadas con densidades relativas moderadas o bajas, así como en limos y arcillas y, de manera muy acusada, en otros suelos muy flojos o con estructura metaestable (quick clays, que no existen en los puerros españoles).

La alternancia de las cargas produce, en las arenas saturadas poco densas, aumentos de la presión intersticial, que puede llegar a crecer monótonamente. El crecimiento de la presión intersticial debilita la resistencia del suelo y puede, eventualmente, provocar su rotura.

La rotura se manifiesta (al menos en los ensayos de laboratorio) mediante un ablandamiento general. El suelo parece comportarse como un líquido. El nombre de licuación, o licuefacción, se suele utilizar para definir este tipo de rotura del terreno.

Normalmente se entiende que se ha alcanzado la rotura (licuefacción) cuando la deformación de corte acumulada iguala o supera el valor del 5%.

Es factible, también, caracterizar la resistencia al corte sin drenaje de un suelo mediante la definición del número de ciclos de carga que lo rompe en ensayos de laboratorio no drenados. Ese número de ciclos de carga será función de las características del terreno, de su estado tensional previo y de la intensidad de la carga dinámica.

En cada procedimiento de análisis dinámico, se utilizará una u otra metodología para caracterizar la resistencia dinámica. Los procedimientos de análisis no están bien establecidos y, por ese motivo, no se pueden dar recomendaciones de tipo general sobre la forma de caracterizar la resistencia.

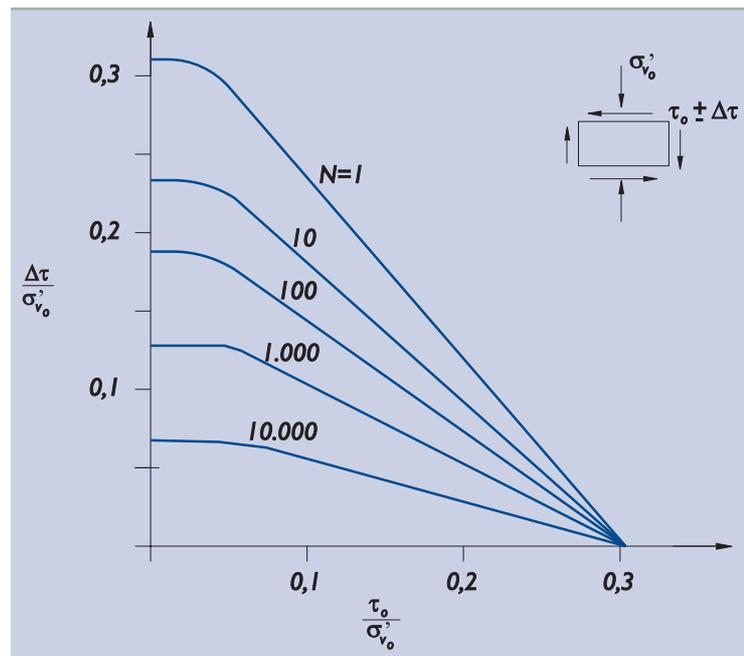
La resistencia dinámica de un suelo puede investigarse en el laboratorio mediante ensayos de corte simple cíclicos no drenados, cuyos resultados pueden expresarse tal como se indica en el gráfico de la Fig. 3.10.1 y que podría corresponder a una arena fina limo-arcillosa normalmente consolidada.

Los ensayos de corte simple cíclicos están particularmente indicados, pues representan el comportamiento frente al tipo de sollicitación que resulta ser más crítico: la alternancia de esfuerzos de corte con presión vertical constante.

Los ensayos triaxiales cíclicos pueden utilizarse también, con las debidas precauciones, para medir la resistencia, en caso de cimentaciones de estructuras sometidas a esfuerzos dinámicos.

En aquellos casos en que las tensiones de corte iniciales puedan suponerse nulas (consolidación isótropa), los diagramas de resistencia del suelo frente a la actuación de acciones dinámicas pueden simplificarse tal como se indica en la Fig. 3.10.2. Dicha figura

Figura 3.10.1. Número de ciclos, N , necesarios para causar una deformación tangencial del 5%



corresponde a un ensayo triaxial cíclico sin drenaje en el que las tensiones tangenciales previas a la carga dinámica son nulas.

La experiencia indica que la resistencia al corte cíclica sin drenaje es prácticamente independiente de la frecuencia de la excitación (rango 1 a 10 Hz).

3.10.2.3 Deformaciones bajo la actuación de cargas cíclicas, sin drenaje

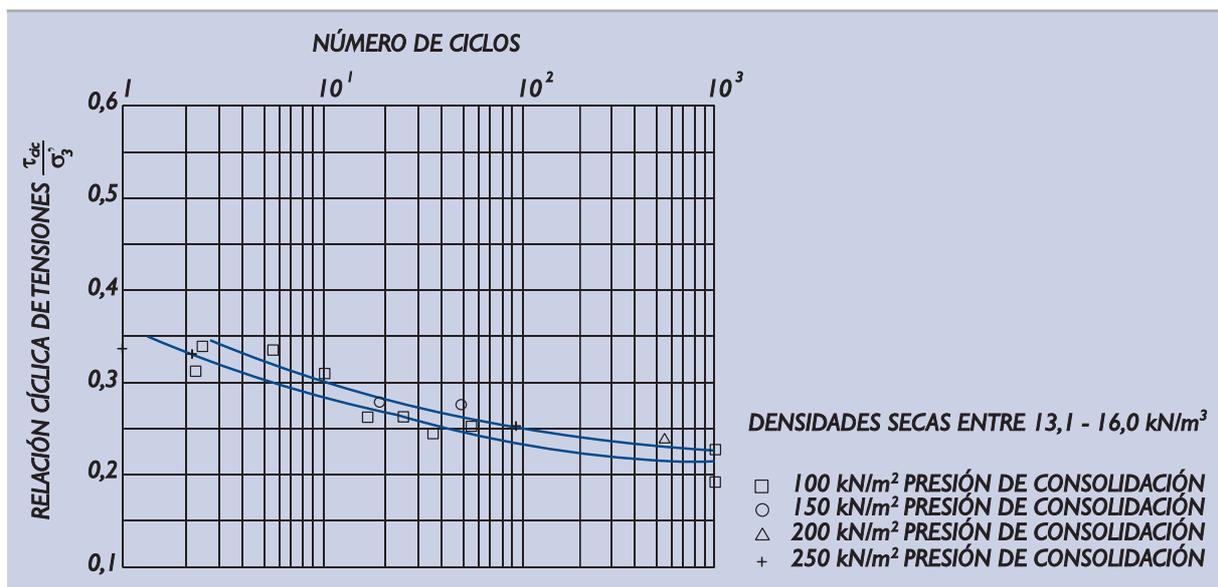
Las deformaciones volumétricas de los suelos cuando se calculan en condiciones no drenadas suelen suponerse nulas, pues la compresibilidad del agua generalmente es muy pequeña cuando se compara con la del propio suelo.

El cálculo geotécnico de deformaciones con volumen constante puede realizarse en términos de presiones totales o en término de tensiones efectivas. Generalmente se utiliza el primer método, cálculo tensodeformacional utilizando las tensiones totales como incógnita, cuando la condición de cálculo es “sin drenaje”.

En el cálculo en presiones totales, la relación tensión-deformación que debe usarse ha de conducir a un modelo de rigidez transversal, G , idéntico al que se utiliza en presiones efectivas y del que se habla en el apartado que sigue.

La condición de constancia de volumen puede conseguirse con valores equivalentes o aparentes del módulo de Poisson próximos a 0,50. El módulo de Poisson real del esqueleto del suelo no interviene en estos cálculos en presiones totales.

Figura 3.10.2. Ejemplo típico de resistencia de una arena saturada frente a la actuación de cargas dinámicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)



Nota: Figura tomada de la tesis doctoral de C. Olalla “Problemas Geotécnicos y Comportamiento Dinámico de los Fondos Costeros Arenosos”. Universidad Politécnica de Madrid, Junio 1992.

Para realizar cálculos sin drenaje en presiones efectivas pueden utilizarse las leyes de tensión deformación que se indican más adelante y leyes de generación de presiones intersticiales acordes de forma que el volumen permanezca constante.

El valor del amortiguamiento viscoso equivalente que puede usarse en los cálculos no depende de las condiciones de drenaje, es sólo función de las deformaciones resultantes y no del tipo de cálculo que se realice. Los valores del amortiguamiento se indican en el apartado que sigue.

3.10.3 Comportamiento dinámico con drenaje

En una primera aproximación, el comportamiento deformacional de los suelos bajo cargas dinámicas, se puede asimilar al de un sólido elástico lineal con amortiguamiento viscoso. Los parámetros que definirían, en ese caso, el comportamiento tensodeformacional serían:

- G = módulo de rigidez transversal.
- ν = módulo de Poisson.
- D = amortiguamiento relativo.

Estos parámetros dependen de la amplitud de la deformación angular. Para deformaciones angulares muy pequeñas (en el rango 10^{-5} a 10^{-6}), los parámetros correspondientes G_o (también llamado $G_{m\acute{a}x}$ en muchos textos) y ν_o pueden obtenerse mediante reconocimientos geofísicos (ver apartado 2.6 de esta Recomendación). En ellos se pueden medir las velocidades de propagación de las ondas de compresión, v_p , y de las ondas de corte, v_s , y de esos dos datos deducir:

$$G_o = \rho_{ap} \cdot v_s^2$$

$$\nu_o = \frac{1 - 2\alpha}{2(1 - \alpha)}$$

donde:

$$\alpha = \frac{v_s^2}{v_p^2}$$

ρ_{ap} = densidad aparente del terreno

Para deformaciones mayores, el módulo de rigidez transversal G es más pequeño, mientras que el valor del módulo de Poisson, ν , cambia poco o aumenta.

Para conocer el valor de estos parámetros en otro rango de deformaciones, es preciso hacer ensayos específicos de laboratorio. El ensayo más adecuado es el de la columna de resonancia. En la Fig. 3.10.3 se reproducen unos resultados típicos de estos ensayos realizados en unas arenas limosas.

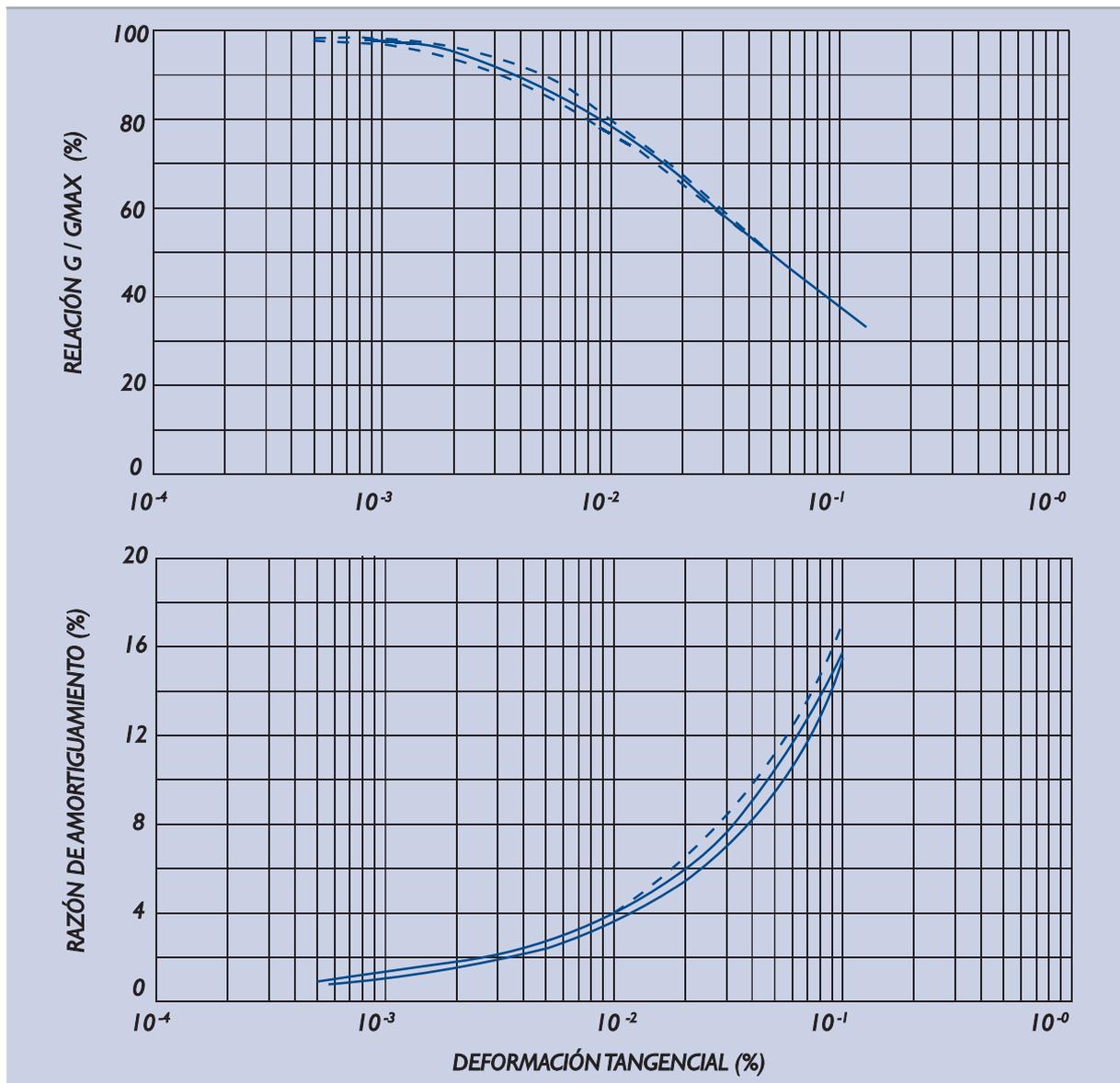
Además, el módulo de rigidez transversal G_o , para pequeñas deformaciones, depende de la presión de confinamiento. Esa relación ha de establecerse ensayando muestras bajo distintas presiones.

El amortiguamiento relativo, D, que generalmente aumenta con la amplitud del movimiento, puede obtenerse también de ese ensayo, con resultados típicos como los indicados en la misma Fig. 3.10.3.

Para la mayoría de los casos la representación del terreno mediante su resistencia al corte y los parámetros G, D y ν (dependientes de la amplitud de la deformación) será, en general, suficientemente precisa. En problemas dinámicos especiales (plataformas off-shore, por ejemplo) pueden ser necesarios modelos de comportamiento del suelo más complejos.

Las cargas dinámicas alternativas y las vibraciones pueden inducir en los suelos no saturados, particularmente si son arenosos, una densificación. Ese aspecto puede ser investigado en laboratorio. En este fenómeno se basan varios de los procedimientos de mejora del terreno definidos en el apartado 3.9.

Figura 3.10.3. Ejemplo típico de parámetros de comportamiento deformacional de un suelo bajo la actuación de cargas cíclicas (suelos arenosos del Puerto de Motril)



Nota: Figuras tomadas de la tesis doctoral de C. Olalla "Problemas Geotécnicos y Comportamiento Dinámico de los Fondos Costeros Arenosos". Universidad Politécnica de Madrid. Junio 1992.

Cuando los suelos están saturados el proceso de densificación requiere la expulsión de parte del agua intersticial. Ese proceso de consolidación retrasará la posible densificación.

Como consecuencia de la densificación, se pueden producir asientos importantes. Serán tanto mayores cuanto mayor sea el número de alternancias de la carga y cuanto mayor sea su amplitud.

Si la sollicitación dinámica fuera de carácter cíclico, con un valor medio definido y con una oscilación sobre ese valor medio de amplitud constante, la deformación volumétrica permanente, ε_p , se podría aproximar mediante una expresión del siguiente tipo:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 \cdot N^\alpha \cdot \exp \frac{\beta}{F}$$

donde:

- ε_0 = deformación volumétrica causada por una carga estática igual al valor máximo de la carga dinámica.
- N = número de ciclos.
- F = relación entre la amplitud de la oscilación de la carga que provocaría la rotura del terreno en un solo ciclo y la amplitud que realmente actúa. Es equivalente a un coeficiente de seguridad local.
- α, β = parámetros adimensionales que pueden obtenerse de ensayos de laboratorio.

Los valores típicos de “ α ” oscilan entre menos de 0,05 y más de 0,15, dependiendo de la sensibilidad del suelo a las alternancias de carga. Los valores típicos de “ β ”, por ese mismo motivo, oscilan entre 1 y 10, aproximadamente.

Si la sollicitación dinámica no es cíclica, sino de tipo irregular, siempre es posible, en primera aproximación, representarla por otra cíclica equivalente que produjera una deformación permanente semejante.

La resistencia de los suelos drenados en condiciones dinámicas puede suponerse en general igual que la correspondiente a condiciones estáticas. Los parámetros resistentes obtenidos en los ensayos estáticos convencionales drenados son de aplicación también al caso de cargas dinámicas.

Cuando el drenaje no es completo, habrá de hacerse alguna consideración relativa a las presiones intersticiales que puedan generarse.

El conocimiento de las variaciones de las presiones intersticiales generadas en el terreno como consecuencia de vibraciones, de acciones sísmicas o por la acción del oleaje o el viento, bien directamente o transmitidas a través de estructuras resistentes, en los fondos marinos en situaciones de drenaje parcial es muy complicado y asociado a importantes incertidumbres. Podría estimarse mediante la integración conjunta de las ecuaciones de la hidráulica y la elastodinámica sin olvidar la compresibilidad del agua y del esqueleto del suelo, tomando como condiciones en el contorno las variaciones de las tensiones totales causadas por la acción en cuestión. Estos cálculos son complejos y su consideración se sale del alcance de esta ROM (Ver ROM I.1. en lo que respecta a las debidas a la acción del oleaje). La mejor forma de conocerlas para cada caso concreto es mediante su observación en prototipo mediante técnicas de auscultación.

Un significativo carácter no elástico del comportamiento de algunos suelos en los que se produce una variación importante de presiones intersticiales al cambiar los esfuerzos de corte (p.e. suelos granulares dilatantes) puede alterar de forma notable los resultados correspondientes a cálculos basados en la simplificación de comportamiento elástico respecto a las leyes de presiones intersticiales que se generan.

Dada la complejidad del problema, se recomienda especialmente para estos casos disponer en obra de sistemas efectivos de observación (auscultación) que permitan contrastar con la realidad los cálculos teóricos que se hubieran realizado y que permita tomar, en su caso, las decisiones necesarias para la estabilidad de la obra.

3.10.4 Comportamiento del suelo frente al sismo

Los movimientos sísmicos son una de las acciones más importantes capaces de producir efectos dinámicos significativos en el conjunto suelo-estructura, así como de variar el comportamiento del suelo, tanto en lo que respecta a su capacidad resistente como a su comportamiento deformacional.

De acuerdo con lo señalado en el apartado 3.10.1 de esta Recomendación, el comportamiento del suelo frente a la acción sísmica será, en general, en condiciones parcialmente drenadas o no drenadas para todo tipo de suelos y rellenos, incluso podría darse en rellenos de todo-uno de escollera, dando lugar, especialmente en los suelos granulares flojos saturados, a crecimientos importantes de las presiones intersticiales y a la pérdida de su capacidad resistente frente a las sollicitaciones de corte. Este fenómeno, denominado licuefacción, es una de las principales causas de fallo a tomar en consideración en el proyecto de obras marítimas y portuarias en zonas sísmicas.

Por tanto y con carácter general, los parámetros de resistencia y de deformación del suelo a considerar en los cálculos cuando se considere la actuación de la acción sísmica, serán los correspondientes a comportamiento no drenado para suelos situados bajo el nivel freático, considerando además la degradación de los parámetros resistentes del suelo debido a la actuación de cargas dinámicas.

Dentro del Programa ROM está previsto dedicar una Recomendación específica a los efectos sísmicos en las obras marítimas y portuarias. Provisionalmente, en este apartado se adelantan algunas ideas básicas para ayudar al ingeniero en el estudio de estos efectos.

3.10.4.1 Caracterización del movimiento sísmico

Los factores principales que caracterizan un determinado terremoto son la magnitud, la intensidad, la aceleración del terreno y el espectro de respuesta. A continuación se incluyen algunas ideas básicas sobre estos cuatro factores.

3.10.4.1.1 MAGNITUD

La energía total liberada por un sismo puede medirse, al menos conceptualmente, registrando los movimientos de la superficie terrestre que tienen lugar durante el terremoto. También puede estimarse mediante consideraciones energéticas aplicadas a la zona de rotura (momento sísmico).

Coexisten varias definiciones de magnitud, con los siguientes nombres:

- M_L = magnitud local o de Richter.
- M_s = magnitud de las ondas de superficie.
- m_b = magnitud de las ondas internas de período corto.
- m_β = magnitud de las ondas internas de período largo.
- M_j = magnitud definida por la Agencia Meteorológica Japonesa.
- M_w = magnitud basada en el momento sísmico.

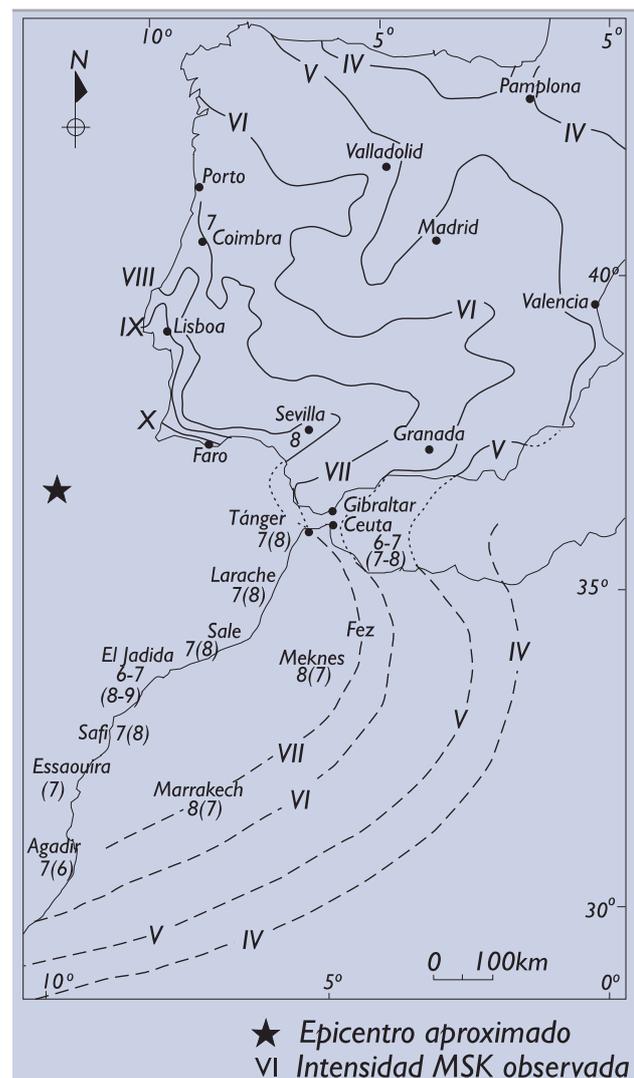
Actualmente se suelen utilizar más los valores de M_w .

En cada caso concreto en el que haya de utilizarse este concepto conviene asegurar cuál es su definición pues existen algunas diferencias que pueden ser de hasta una unidad para terremotos grandes.

3.10.4.1.2 INTENSIDAD

La intensidad causada por un sismo puede valorarse de manera algo objetiva mediante escalas de daño previamente establecidas. En Europa se ha convenido la redacción de la Escala Macrosísmi-

Figura 3.10.4. Isosistas del terremoto de Lisboa de 1755



ca Europea, EMS, que es muy similar a la original MSK de Medvedev, Sponheuer y Karnik y que básicamente coincide (escala de doce grados) con la escala Mercalli Modificada (o Rossi-Forell) que se suele utilizar en América. En Japón se utiliza una escala propia de diez grados.

Cada terremoto produce intensidades de daño generalmente decreciente con la distancia al epicentro. Tras el censo de los daños causados por un determinado terremoto se puede preparar el mapa de “atenuación”, también llamado mapa de isosistas, correspondiente. En la Fig. 3.10.4 se incluye el mapa de isosistas del terremoto de Lisboa de 1755, el mayor de los que se conocen que hayan afectado a la península Ibérica.

La intensidad epicentral, I_0 , tiene cierta relación con la magnitud del terremoto. En esa relación intervienen factores tales como la profundidad focal, la estructura geológica, el mecanismo focal, el recubrimiento de suelos, etc.

3.10.4.1.3 ACELERACIÓN DEL TERRENO

La aceleración del terreno durante un movimiento sísmico puede definirse, en cada punto (tres coordenadas), mediante un vector (tres componentes). El registro continuo de una componente en un determinado lugar permite definir un acelerograma del sismo.

Los acelerogramas correspondientes a puntos ubicados en la superficie del terreno son diferentes dependiendo en la naturaleza del suelo que pueda recubrir la roca en el punto en cuestión.

Para una determinada zona, se suele definir el valor de la aceleración máxima, a_{max} , también llamada aceleración de pico, PGA (Peak Ground Acceleration), que representa el mayor valor de la componente horizontal de la aceleración y que, además, suele referirse a las condiciones de “suelo firme” o roca.

El valor de a_{max} correspondiente a determinados periodos de retorno está incluido en la mayoría de los códigos o normas sísmicas como parámetro definitorio de la acción sísmica.

En España está actualmente en vigor la Norma de Construcción Sismorresistente: parte general y edificación (NCSE-02) cuyas prescripciones de índole general son de aplicación obligatoria a las obras portuarias. En dicha norma se incluye, bajo la denominación de aceleración sísmica básica, a_b , un valor característico de la aceleración horizontal máxima, asociado a un periodo de retorno del orden de 500 años, correspondiente a cada municipio español. En la Fig. 3.10.5. se incluye el mapa de peligrosidad sísmica de dicha Norma que suministra simplificada-mente el valor de dicho parámetro.

3.10.4.1.4 ESPECTRO DE RESPUESTA

La acción del sismo sobre un móvil de un grado de libertad, con frecuencia de vibración natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (K = \text{constante de rigidez, } M = \text{masa})$$

y amortiguamiento viscoso de constante C , puede calcularse, de manera inmediata, mediante la expresión:

$$x(t) = \frac{1}{\omega_d} \int_0^t e^{-\omega_n \cdot D(t-\tau)} \cdot \cos [\omega_d(t-\tau)] \cdot a_g(\tau) \cdot d\tau$$

donde :

$x(t)$ = desplazamiento relativo del móvil respecto al terreno.

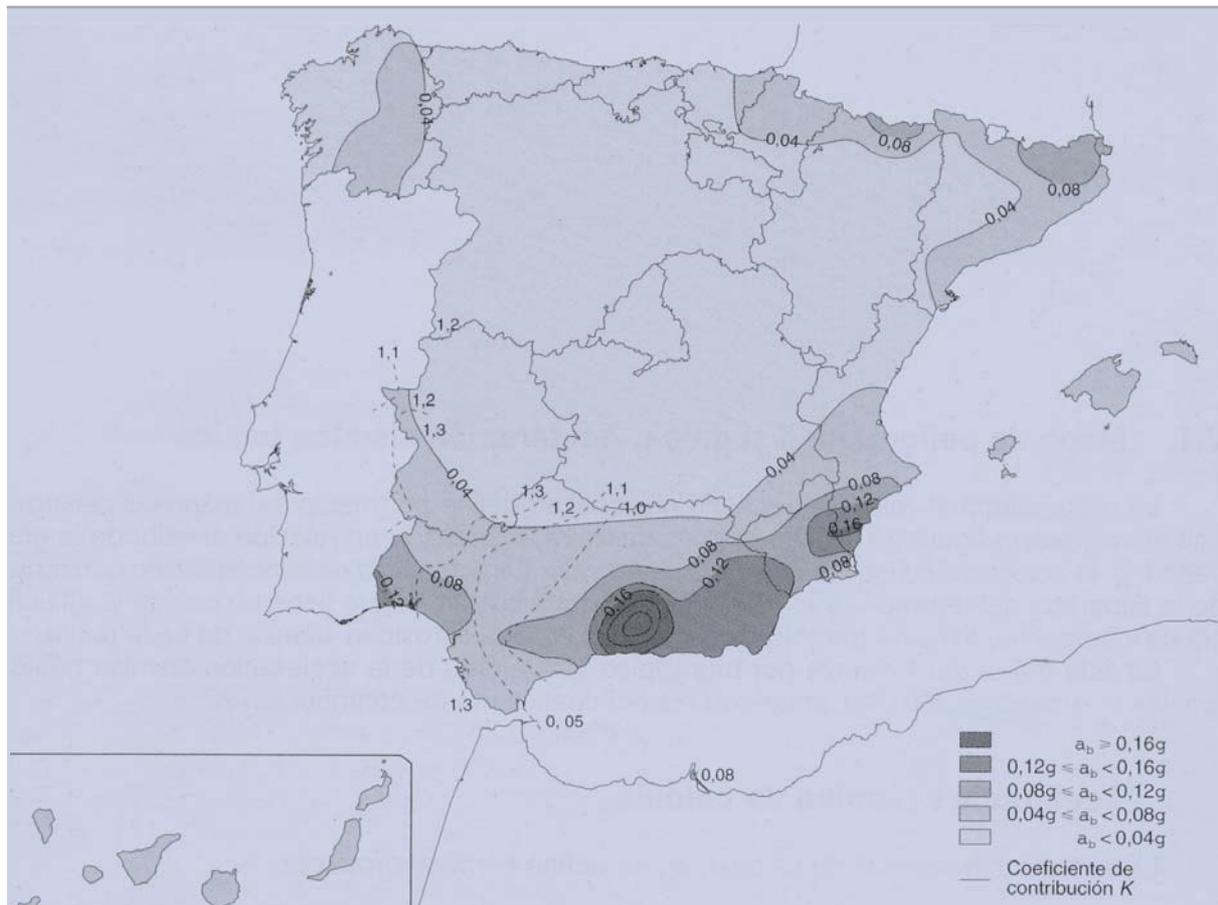
$a_g(\tau)$ = aceleración del terreno (acelerograma).

ω_n = frecuencia natural del móvil.

ω_d = frecuencia amortiguada del móvil; $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-D^2}$

D = amortiguamiento relativo, $D = \frac{C}{2\sqrt{KM}}$

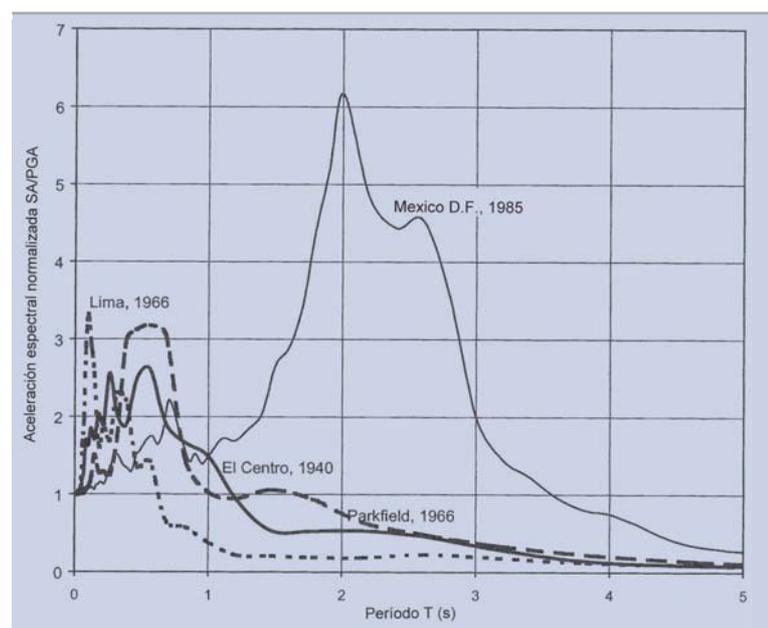
Figura 3.10.5. Mapa español de peligrosidad sísmica (NCSE-02)



De esa expresión es posible obtener la aceleración máxima del móvil o aceleración espectral, SA. Normalmente se utiliza la expresión aproximada $SA = \omega_n^2 \times x_{max}$; y a ese valor se le denomina pseudo-aceleración absoluta, que es función de su frecuencia natural ω_n (o del periodo correspondiente $T = 2\pi/\omega_n$) y de su amortiguamiento relativo, D.

Se define como espectro de respuesta de aceleraciones absolutas de un sismo a la función que relaciona el valor de SA con T y D. En la Fig. 3.10.6 puede verse un dibujo típico de algunos espectros de respuesta.

Para una determinada zona es posible definir espectros de respuesta estándar o envolventes de espectros reales para su utilización en los pro-

Figura 3.10.6. Ejemplo de espectros de respuesta (amortiguamiento $D = 5\%$)

yectos, correspondiente tanto a movimientos horizontales como verticales. La vigente Norma española (NCSE-02) define espectros tipo en España en función de las características locales del terreno, de la ubicación de la zona (fundamentalmente la distancia a la falla Azores-Gibraltar que domina la actividad sísmica peninsular) y del amortiguamiento relativo de la estructura resistente.

3.10.4.2 Licuefacción del suelo debido a la acción sísmica

Muchos de los daños producidos por terremotos en puertos han sido debidos a fenómenos de licuefacción del suelo. Un ejemplo claro es la destrucción prácticamente completa de Puerto Valdez durante el terremoto de Alaska (1964). Otros tipos de daños en puertos debidos a terremotos que se encuentran documentados se recogen en la Tabla 3.10.1.

Para predecir la posibilidad de que se produzca el fenómeno de la licuefacción en un suelo por la acción de un sismo es hoy prácticamente obligado seguir el procedimiento empírico que se describe a continuación. Además de este método el ingeniero puede y debe utilizar otros procedimientos o metodologías complementarias que considere convenientes, sin que ello aconseje omitir el método que aquí se describe.

Tabla 3.10.1. Ejemplos de daños sísmicos en puertos en las últimas dos décadas

Año	País	Puerto	Daños
1983	Japón	Akita	Dos muelles de tablestacas rotos. Colapso de grúas.
1984	Chile	San Antonio	Rotura muelles de bloques. Colapso de grúas
1985	Grecia	Patras	Colapso de dique de abrigo en talud
1986	Grecia	Kalamota	Rotura de muelle de bloques
1989	Argelia	Argel	Rotura de muelle de bloques
1989	EE.UU.	Oakland	Muelle de pilotes
1990	Filipinas	San Fernando	Muelle de pilotes
1993	Japón	Kushiro	Muelles de cajones y tablestacas
1993	Japón	Hakodate	Muelle de tablestacas
1993	EE.UU.	Guam	Muelle de tablestacas
1993	Japón	Okushuri	Dique de abrigo
1994	EE.UU.	Los Ángeles	Muelle de pilotes
1995	Japón	Kobe	Muelle de pilotes, duques de alba, muelle de recintos de tablestacas, dique de abrigo. Colapso de grúas
1999	Turquía	Devince	Colapso de grúas
1999	Taiwan	Taichung	Muelle de cajones

Lista basada en la información de la publicación "Seismic Guidelines for Port Structures" PIANC. Editado por Balkema. 2001.

Reconocimiento geotécnico

En primer lugar, para evaluar la seguridad frente al fenómeno de la licuefacción debe realizarse un reconocimiento geotécnico detallado del terreno considerado. Ese reconocimiento debe permitir la determinación precisa de los siguientes parámetros:

- ◆ Densidad seca, humedad y peso específico de las partículas del suelo.
- ◆ Granulometría y, si hubiese componente arcillosa, plasticidad de la fracción fina del suelo.
- ◆ Índice N del ensayo SPT. Alternativamente se pueden realizar ensayos de penetración continua CPTU o ensayos penetrométricos dinámicos. En todo caso los ensayos SPT no deben omitirse y los resultados de otros posibles ensayos deben traducirse a valores equivalentes del SPT mediante correlaciones locales contrastadas.

Adicionalmente, la calidad del estudio mejorará si se dispone de ensayos geofísicos (cross-hole o similar) que permitan conocer la velocidad de propagación de ondas de corte, v_s , a cada profundidad.

El conocimiento de la posibilidad de que se produzca el fenómeno de la licuefacción será también más preciso si se dispone de ensayos dinámicos del suelo realizados en laboratorio, particularmente ensayos de columna resonante o ensayos de corte simple cíclico que permitan conocer los parámetros G, D y ν antes mencionados (apartado 3.10.2.3).

Valor de cálculo del índice N del SPT. Valor $(\bar{N})_{60}$

Conocidos los datos precedentes, la resistencia de un determinado nivel del suelo a la licuefacción (capa situada a una profundidad z) se define, a cada profundidad, en función del número $(\bar{N})_{60}$ que es el valor medio del índice N del SPT después de corregirlo por el efecto de la sobrecarga (1) y por el efecto de la energía de ensayo (2). Estas dos correcciones pueden practicarse según se indica en los apartados 3.5.4.3 (corrección 1) y 2.9.1 (corrección 2).

Valor de la resistencia a la licuefacción. Parámetro CRR

Para cada valor de $(\bar{N})_{60}$ se obtiene un valor del número adimensional CRR (Cyclic Resistance Ratio) que mide la resistencia a la licuefacción. Este número es diferente según el contenido en finos del terreno.

Los valores que en la actualidad se consideran más adecuados para el parámetro CRR se incluyen en la Tabla 3.10.2.

Tabla 3.10.2. Valores del parámetro CRR

$(\bar{N})_{60}$	Porcentaje de finos		
	$\leq 5\%$	15%	30%
5	0,06	0,10	0,13
10	0,11	0,16	0,18
15	0,16	0,23	0,26
20	0,22	0,29	0,40
25	0,29	>0,4	>0,5
30	>0,4		

Esta misma información se resume de manera gráfica en la Fig. 3.10.7. Estos valores son empíricos y están basados en datos de campo que van acumulándose. Es posible que sufran cierta modificación con el paso del tiempo.

El valor de CRR indicado está obtenido únicamente para terremotos de magnitud $M_w = 7,5$. Cuando la magnitud del terremoto sea diferente se deben multiplicar los valores de CRR por los factores de corrección siguientes.

Tabla 3.10.3. Factor corrector del parámetro CRR en función de la magnitud del sismo (Youd e Idriss, 1997)

Magnitud M_w	Factor de corrección
5,5	2,20 a 2,80
6	1,76 a 2,10
6,5	1,44 a 1,60
7	1,19 a 1,25
7,5	1
8	0,84
8,5	0,72

El valor obtenido de la resistencia adimensional, CRR, después de considerar el valor de $(\bar{N})_{60}$, el porcentaje de finos y la magnitud del terremoto, se debe comparar con la sollicitación que se describe en el subapartado siguiente.

Solicitación sísmica. Parámetro CSR

A una determinada profundidad dentro del depósito de suelos y con la información geotécnica disponible, se puede calcular el número adimensional siguiente:

$$CSR = 0,65 \frac{\sigma_{v_o}}{\sigma'_{v_o}} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$$

donde:

CSR = tensión de corte cíclica adimensional (Cyclic Stress Ratio).

σ_{v_o} = tensión vertical total, antes del terremoto.

σ'_{v_o} = tensión vertical efectiva, antes del terremoto.

a_{max} = valor de cálculo de la aceleración horizontal máxima del terreno en el emplazamiento considerado, equivalente a la aceleración sísmica de cálculo obtenida a partir de la aceleración sísmica básica a_b , de acuerdo con lo previsto en la norma NCSR-02 (Ver Fig. 3.10.5).

g = aceleración de la gravedad.

r_d = factor de reducción que depende principalmente de la profundidad.

El último factor (r_d) es siempre menor que la unidad y mide la reducción del valor de a_{max} con la profundidad. Su determinación requiere un cálculo específico de amplificación (deconvolución). Es también posible suponer el siguiente valor aproximado:

$$r_d = 1 - 0,001 \cdot z^2$$

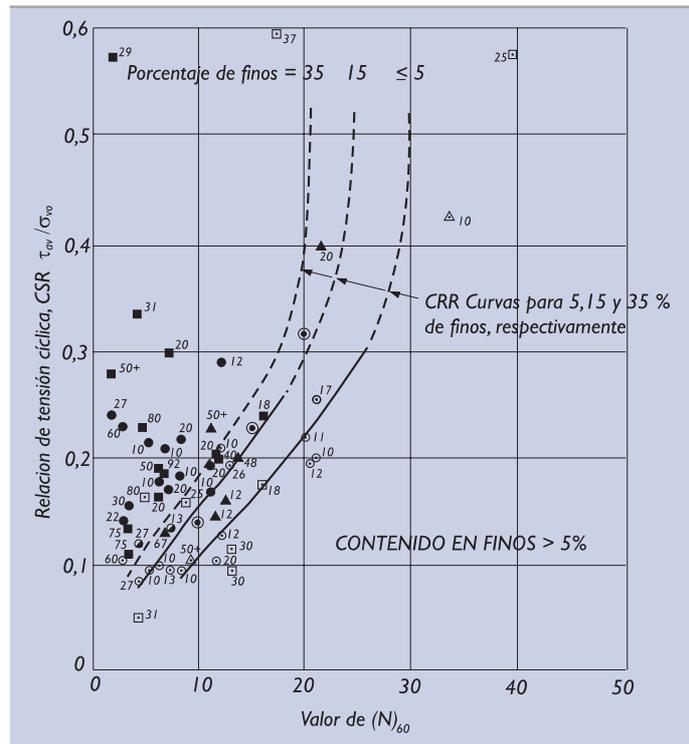
donde z es la profundidad de la zona cuya licuefacción se investiga, expresada en metros.

Verificación de la seguridad frente a la licuefacción

La comparación de resistencia, CRR, y sollicitación, CSR, permite definir el coeficiente en seguridad frente a licuefacción:

$$F = \frac{CRR}{CSR}$$

Figura 3.10.7. Resistencia a la licuefacción (20)



(20) Figura preparada a partir de la información publicada por Youd, T.L. and Idriss I.M. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. Apr. 2001. Vol. 127. N° 4.

Cuando este coeficiente es próximo a la unidad ($0,9 < F < 1,1$) se debe entender que las posibilidades de licuefacción del suelo son altas. Aunque existen publicaciones que intentan cuantificar las posibilidades de licuefacción partiendo del valor de F , en la actualidad aún no es posible dar validez a este procedimiento.

Cuando el coeficiente de seguridad a la licuefacción no sea aceptable ha de procederse a cambiar la tipología de la solución o, en casos muy específicos, a proceder a un tratamiento o sustitución del terreno, o a la colocación de drenes para facilitar la disipación de las presiones intersticiales generadas. En España, por este motivo, se ha realizado un tratamiento masivo de densificación mediante la técnica de vibrosustitución (ver apartado 3.9.3) en las arenas de la bahía de Algeciras para construir las instalaciones de la Central Térmica de Los Barrios.

3.10.4.3 Acciones sísmicas transmitidas al terreno de cimentación a través de la estructura resistente

La respuesta dinámica del conjunto suelo-estructura, o movimiento de este conjunto al ser solicitado por una acción sísmica, será tanto más acusada cuando más próximo sea el periodo propio de vibración de dicho conjunto suelo-estructura al periodo predominante del movimiento sísmico.

Una gran parte de las estructuras portuarias, especialmente las de gravedad, tienen periodos propios de oscilación similares a los periodos predominantes en los movimientos sísmicos ($0,2 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$), por lo que en la mayor parte de los casos se producirá un importante comportamiento dinámico del conjunto suelo-estructura durante el movimiento sísmico, que dará lugar a la transmisión de cargas importantes al terreno de cimentación.

Las acciones transmitidas al cimiento no son en este caso evidentes. Su determinación exige previamente realizar cálculos de interacción suelo-estructura.

El cálculo de interacción suelo-estructura bajo sollicitación sísmica puede realizarse con metodologías muy diversas o con procedimientos empíricos aproximados de carácter pseudoestático.

En el apartado 3.10.5 de esta Recomendación se definen los procedimientos más comunes que han sido avallados por cierta experiencia de uso.

3.10.5 Cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura

El cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura puede realizarse con metodologías muy diversas. Los procedimientos más comunes son los siguientes:

Cálculos con modelos numéricos con representación completa del cimiento

a. Este cálculo se realiza mediante los siguientes pasos

- 1º Definición del modelo geométrico discreto (elementos finitos o diferencias finitas) que representa una sección plana del problema en estudio incluyendo tanto la estructura como una fracción significativa del cimiento. Los cálculos dinámicos tridimensionales son también posibles, aunque requieran un gran esfuerzo para la preparación del modelo geométrico. En los contornos del modelo han de incluirse muelles y amortiguadores que representen con cierta precisión el amortiguamiento de radiación.
- 2º Definición de parámetros del modelo de comportamiento elemental. Normalmente, para facilitar los cálculos, el terreno se representa mediante un modelo elástico lineal y viscoso en término de tensiones totales. Los parámetros que regulan la relación tensión-deformación (G , ν y D) (ver apartados 3.10.2 y 3.10.3) deben adecuarse al nivel de deformación resultante, lo que requiere un cálculo iterativo hasta conseguir la precisión suficiente en la representación del comportamiento no lineal.

En lugar del modelo precedente, es también posible, aunque más complejo, realizar cálculos dinámicos en presiones efectivas, incluyendo, en este caso, una doble formulación acoplada: deformación (1), generación-disipación de presiones intersticiales (2). Estos cálculos son muy sensibles a pequeños detalles y su utilización generalmente está en la actualidad reservada a trabajos de investigación.

- 3° Definición de la acción. El cálculo dinámico trata de representar el comportamiento del conjunto estructura-terreno ante una situación de cargas rápidamente variables. El carácter dinámico proviene del hecho diferencial, respecto a las condiciones estáticas, de producirse aceleraciones significativas en la estructura y/o el terreno.

La acción dinámica puede representarse mediante la historia temporal de valores de los parámetros representativos correspondientes:

- ◆ En el caso del oleaje sería una historia temporal de empujes o presiones causados por la serie de alturas de ola.
- ◆ En el caso sísmico la forma de representar las acciones sísmicas y la forma de representar el problema (geometría y características de los materiales) deben guardar entre sí una cierta relación. Es decir, la acción sísmica depende del modelo geométrico utilizado para representar el problema.

Una de las formas de representarse es mediante un conjunto de fuerzas de inercia iguales a los productos de las masas del modelo de cálculo por las aceleraciones que se considera que afectan a la base del modelo. Una vez definidas estas fuerzas, los cálculos serán en todo semejantes a los cálculos dinámicos realizados para analizar los efectos de otras acciones dinámicas externas (oleaje, vientos, impactos, etc.). Como el movimiento sísmico se especifica con carácter general para el terreno firme, para obtenerlo en la base del modelo se requiere realizar cálculos previos de amplificación (aumentos de las aceleraciones debido a suelos blandos situados encima de terrenos firmes) y de deconvolución (reducciones de las aceleraciones con la profundidad) a partir del movimiento especificado.

- 4° Proceso de integración. Para realizar cálculos dinámicos acoplados (presiones efectivas) es obligado realizar la integración del problema mediante un esquema explícito de diferencias finitas para la variable tiempo.

Para los cálculos en presiones totales, el proceso de integración (resolución) del problema dinámico puede realizarse mediante un esquema explícito de diferencias finitas en el dominio del tiempo (alternativa 1) o mediante la aplicación de la transformación de Fourier para resolver el problema para cada frecuencia y posterior integración en ese dominio (alternativa 2) o mediante un análisis modal espectral (alternativa 3). Aunque estos procedimientos son teóricamente equivalentes, el primero parece ofrecer cierta ventaja para tratar problemas no lineales.

b. Cálculo con una representación simplificada del cimiento

El cálculo dinámico estructural más extendido es aquél en que el cimiento queda representado por una serie de resortes y amortiguadores equivalentes. El modelo estructural puede consistir en una partición en elementos finitos o en un modelo de masas y resortes concentrados que representa la geometría, la rigidez y la inercia de la estructura en estudio de manera suficientemente precisa.

Tanto el terreno como la estructura han de suponerse elásticos lineales. Un cálculo iterativo permite adecuar los parámetros al nivel de deformaciones global.

El amortiguamiento del sistema ha de estimarse independientemente a partir de los resultados de los ensayos dinámicos que se deben realizar a estos efectos. La acción dinámica se define normalmente

mediante un sistema adecuado de fuerzas nodales. El proceso de integración puede ser cualquiera de los que se han indicado antes (subapartado a).

Las “constantes de resorte” son función de la amplitud de la deformación y de las frecuencias de la acción.

Cuando el proceso de integración se realiza en el dominio de las frecuencias no existe problema en la especificación de las “constantes de resorte” (relación fuerza-deformación) dependientes de este factor. En otros casos es necesario hacer alguna simplificación.

Como aproximación, “las constantes de resorte” pueden deducirse con las fórmulas de la estática citadas en los apartados precedentes de esta ROM para cimentaciones superficiales (apartado 3.5) o profundas (apartado 3.6). En estas fórmulas deben utilizarse los coeficientes dinámicos deducidos como se indica en el apartado 3.10.3.

Para cálculos sísmicos preliminares, o para aquellos casos de cálculos sísmicos en los que éstos no necesitan ser muy precisos, se puede suponer la siguiente relación entre el valor medio del módulo de rigidez transversal G que puede usarse y el módulo de rigidez transversal para pequeñas deformaciones, G_0 .

Intensidad Local MSK	Relación G/G_0
VI	I
VII	0,80
VIII	0,50
IX	0,35

En estos cálculos preliminares o aproximados, no se aplicarán estas reducciones del módulo a aquellos suelos cuya sollicitación esté lejos de aquélla que puede provocar su rotura. A falta de otras estimaciones se podrá suponer que $G = G_0$ para:

Todos los suelos cuya velocidad de propagación de ondas de corte, medida mediante ensayos geofísicos “in situ”, sea:

$$v_s > 300 \text{ m/s}$$

- Todos los suelos, cualquiera que sea su deformabilidad, que estén situados a más de 20 m de profundidad.
- En esos cálculos se adoptará un valor del amortiguamiento relativo acorde con el módulo de rigidez transversal correspondiente.

Cuando buena parte de la estructura está enterrada y el terreno se representa mediante muelles y amortiguadores, la definición de la acción sísmica en la base del modelo puede requerir unos cálculos previos. El movimiento al nivel de la unión entre la estructura y el cimiento es diferente del movimiento del terreno en campo libre (sin estructura) aún en el caso de que la estructura no tuviese inercia alguna. Este efecto adicional de interacción, que se conoce como interacción cinemática, será preciso considerarlo, bien con un cálculo dinámico previo, o bien con alguna consideración debidamente justificada. No obstante lo anterior, es relativamente frecuente despreciar este efecto (válido en algunos casos teóricos) y suponer que la acción sobre el modelo es, exclusivamente, un conjunto de fuerzas de inercia que actúan sobre la estructura y cuyo valor se estima a partir de las aceleraciones sísmicas al nivel del terreno de apoyo.

3.10.5.1 Cálculo dinámico de la cimentación

El cálculo dinámico de la cimentación puede realizarse conjuntamente con el cálculo estructural cuando el procedimiento (o la alternativa) elegida es la “a” antes mencionada. (Ver apartado 3.10.5). En otro caso (opción

“b”) es preciso realizar un modelo específico del cimiento y someterlo a las acciones dinámicas que se obtienen del cálculo estructural.

En ambos casos (cálculo conjunto o cálculo dinámico independiente), como resultados del cálculo de la cimentación se obtendrá, en cada zona del cimiento, la información siguiente:

- a. Evolución (o historia temporal) de desplazamientos y de tensiones totales y efectivas (cálculos acoplados tensión-deformación-flujo).
- b. Evolución de desplazamientos y tensiones totales, cuando el cálculo se realice en presiones totales sin consideración directa de las consecuencias del flujo de agua en el interior del terreno.

Con esta información podrá juzgarse acerca del comportamiento del sistema. En el primer caso de manera directa pues del cálculo se obtienen desplazamientos y tensiones efectivas que permiten enjuiciar la seguridad de la obra y la posible funcionalidad durante y después del evento (temporal u otra causa).

En el segundo caso (cálculo en presiones totales) es preciso un proceso de interpretación posterior para obtener las presiones intersticiales generadas por la acción dinámica. La base de partida de esta interpretación será la información sobre la resistencia dinámica del suelo obtenida en ensayos de laboratorio en tensiones totales con historias de tensiones similares a las resultantes del cálculo.

Si tras este proceso de evaluación resultara que en ninguna zona significativa del cimiento se supera el umbral de plastificación o rotura (licuefacción) en ningún momento, entonces la respuesta del cimiento podría considerarse prácticamente elástica. Debería concluirse que la situación es aceptable.

Para acciones dinámicas importantes, sin embargo, es posible que el cimiento experimente roturas parciales transitorias que podrían ser admisibles, pues no tendrían que significar necesariamente la ruina de la obra sino un desplazamiento residual apreciable.

El cálculo dinámico de desplazamientos en geotecnia ha sido practicado durante décadas y su aplicación a los problemas de rotura es adecuada y recomendable. Conceptualmente estriba en admitir la rotura instantánea según el mecanismo que indica el cálculo y postular una cierta ley de resistencia residual en ese momento.

Las leyes de la dinámica de bloques rígidos permitirán escribir las ecuaciones del movimiento de la parte móvil de ese mecanismo de rotura e integrarlas para conocer el desplazamiento que ocurre durante esa fase parcial del movimiento. Este procedimiento de cálculo está bien establecido para el cálculo de movimientos de muros y taludes y puede aplicarse de manera análoga también a las cimentaciones de obras marítimas y portuarias sometidas a la acción del oleaje.

3.10.5.2 Cálculo pseudo-estático de la cimentación

El cálculo dinámico de una cimentación o en general de una construcción apoyada en el terreno (incluyendo excavaciones con o sin sostenimiento) puede abordarse con los procedimientos usuales de la estática pero añadiendo fuerzas adicionales que representan a la acción dinámica.

Las acciones estáticas equivalentes que han de suponerse dependen fundamentalmente del tipo de problema en estudio, tal como se comenta a continuación.

3.10.5.2.1 ACCIONES ESTÁTICAS EQUIVALENTES A LA ACCIÓN DEL OLAJE O DEL VIENTO

En los problemas de carga dinámica debida al oleaje, al viento sobre la estructura, etc., se pueden utilizar métodos de cálculo estático representando las acciones dinámicas mediante unas acciones estáticas equivalentes.

Las acciones del oleaje transmitidas al terreno de cimentación a través de una estructura resistente dependen del periodo y de la magnitud de la acción y, especialmente, de la respuesta del conjunto suelo-estructura o movimiento del mismo al ser solicitado por dicha acción.

Las estructuras portuarias como las obras de gravedad construidas con cajones, los espaldones y otras estructuras monolíticas tienen periodos naturales de oscilación en el rango entre 0,2 y 2 segundos (muy alejados de los periodos del oleaje), por lo que no son esperables amplificaciones dinámicas de las cargas transmitidas al terreno debidas a la acción del oleaje en condiciones de no rotura o a las oscilaciones del nivel del mar por la acción de las mareas, pudiendo aceptarse que éstas se transmiten al terreno con igual periodo que la acción actuante. En estos casos, la acción transmitida al cimiento podrá obtenerse por medio de análisis estático, en los que no es necesario considerar a priori, la rigidez del conjunto suelo-estructura.

Por el contrario, son esperables amplificaciones dinámicas importantes en las cargas transmitidas al terreno de cimentación cuando estas estructuras están solicitadas por oleajes en condiciones de rotura, al tener estas acciones periodos de oscilación del orden de magnitud de los del conjunto suelo-estructura. En estos casos, las acciones transmitidas al cimiento son de difícil evaluación, siendo necesario un cálculo dinámico específico o un procedimiento empírico aproximado alternativo (p.e. multiplicación de la acción estática por un factor dinámico de carga) que permita definir la acción dinámica transmitida al cimiento para la estructura en cuestión.

El cálculo dinámico del conjunto suelo-estructura puede realizarse con metodologías muy diversas. En el apartado 3.10.5. se definen los procedimientos más comunes, que han sido avalados por cierta experiencia de uso.

El proceso de obtención de las acciones estáticas equivalentes a la acción del oleaje o del viento incluye la consideración de ciertos “factores dinámicos de carga” o directamente de fuerzas equivalentes obtenidas a partir de formulaciones empíricas de base experimental, los cuales escapan del alcance de esta ROM.

En aquellos documentos ROM dedicados a las acciones del viento y del oleaje, así como a las obras específicas, se definirán las fuerzas estáticas equivalentes asociadas al valor representativo adoptado en cada combinación de acciones para el temporal de oleaje o viento.

Para evaluar el comportamiento frente a Estados Límite de Servicio puede hacerse una hipótesis semejante pero para un temporal menos intenso (más frecuente) según se indica en el apartado 3.3 de este documento.

Las fuerzas estáticas equivalentes que actúan sobre el cimiento podrán obtenerse a partir de un cálculo estructural estático considerando la actuación sobre la estructura de las acciones estáticas equivalentes a la acción dinámica o adoptando la fuerza máxima transmitida al cimiento deducida de un cálculo dinámico.

Para la evaluación de la seguridad frente a los modos de fallo asociados a los Estados Límite Últimos de las cimentaciones superficiales y profundas, cuando se analizan mediante las fórmulas estáticas que se indican en los apartados 3.4 y 3.5 de esta ROM, se recomienda no añadir, como acción dinámica debida a la inercia del suelo, ninguna fuerza adicional.

3.10.5.2.2. ACCIONES ESTÁTICAS EQUIVALENTES A LA ACCIÓN SÍSMICA

Cuando, de forma aproximada, se verifiquen modos de fallo mediante formulaciones estáticas, la consideración del sismo podrá realizarse a través de acciones estáticas equivalentes. Dichas acciones equivalentes dependen de la tipología de la estructura, de las características de la interacción suelo-estructura y del modo de fallo analizado.

En el documento ROM 0.6 dedicado a la acción sísmica, así como en aquellos documentos ROM dedicados a las obras específicas, se definirán con detalle las fuerzas estáticas equivalentes a la acción sísmica.

No obstante lo anterior, se ha considerado conveniente incluir en esta Recomendación las fuerzas estáticas equivalentes a la acción sísmica necesarias para la verificación de los modos de fallo geotécnicos más usuales que se presentan en las obras marítimas y portuarias.

3.10.5.2.2.1 FUERZAS ESTÁTICAS EQUIVALENTES SOBRE LOS CIMIENTOS

Las fuerzas estáticas equivalentes que actúan sobre el cimiento podrán obtenerse a partir de un cálculo estructural estático considerando la actuación sobre la estructura de las acciones estáticas equivalentes a la acción sísmica o adoptando un porcentaje de la fuerza máxima transmitida al cimiento deducida de un cálculo dinámico. A falta de otra información, podrá suponerse como fuerza estática equivalente el 65% de dicho valor máximo.

Si el cálculo dinámico no incluye la masa del propio elemento de cimentación (zapata o encepado), entonces habrá que añadir una fuerza adicional que, a falta de otra indicación más precisa que pudiera darse en otro lugar específico (otros documentos ROM), será el producto de su masa total (densidad emergida) por la aceleración horizontal, a_h , definida en el apartado 3.10.5.2.2.2.

3.10.5.2.2.2 FUERZAS ESTÁTICAS EQUIVALENTES PARA LA VERIFICACIÓN DE MODOS DE FALLO DE PÉRDIDA DE LA ESTABILIDAD GLOBAL

Para comprobar el efecto de la acción sísmica en el estudio de los problemas de estabilidad global controlados por la resistencia del terreno, y a falta de un mejor procedimiento para realizar el cálculo dinámico, se podrá suponer que la acción sísmica equivale a unas fuerzas máxicas de inercia definidas como el producto de la masa por las aceleraciones siguientes:

$$\text{Horizontal: } a_h = \alpha \cdot a_c$$

$$\text{Vertical: } a_v = \frac{1}{2} a_h$$

Siendo a_c la aceleración sísmica de cálculo en el emplazamiento, definida en la vigente Norma de Construcción Sismorresistente (NCSE-02).

El factor “ α ” trata de evaluar la flexibilidad de la obra frente a los terremotos. Su valor debe ser tanto más alto cuanto más coartado esté el movimiento.

Taludes exentos y muelles de gravedad sin coacciones, etc.	$\alpha = 0,5$
Taludes con inclusiones rígidas (p.e. pilotes) o muros con coacciones en cabeza, muelles de pantallas ancladas, etc.	$\alpha = 0,75 \text{ a } 1$

3.10.5.2.3 EMPUJES DE TIERRA EQUIVALENTES SOBRE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN

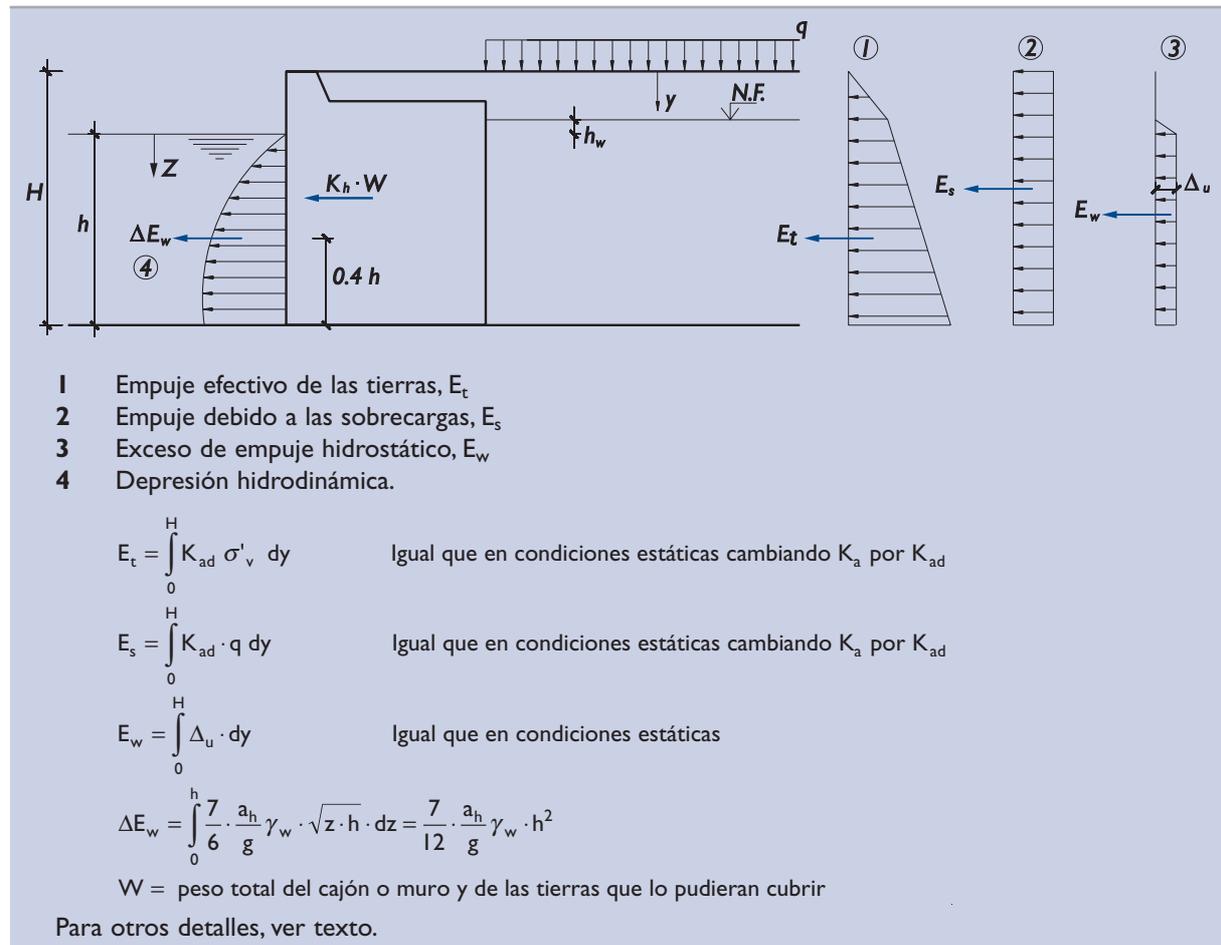
La acción sísmica hace que el empuje sobre los muros aumente transitoriamente. El empuje activo en condiciones sísmicas es mayor que el correspondiente a la situación estática.

De forma similar, el empuje pasivo que pueden transmitir las estructuras de contención que se apoyan contra el terreno puede reducirse notablemente durante los sismos. El empuje pasivo en condiciones sísmicas es menor que el correspondiente a la situación estática.

En la ROM 0.6 “Acción Sísmica” se incluirán Recomendaciones detalladas sobre la metodología que debe seguirse para considerar el efecto sísmico en el proyecto de las estructuras de contención.

Provisionalmente, se avanza aquí un método sencillo para el cálculo de empujes, cuya aplicación es recomendable en aquellos casos en los que la acción sísmica sea de carácter moderado. Esto es, que no condicione de forma importante el proyecto. En otras circunstancias, el ingeniero debe usar métodos más adecuados.

Figura 3.10.8. Esquema de empujes equivalentes sobre una estructura de contención en condiciones sísmicas



3.10.5.2.3.1 EMPUJE ACTIVO

a. Coeficiente de empuje activo en condiciones dinámicas

El coeficiente de empuje activo en condiciones dinámicas se puede suponer igual al definido por la expresión:

$$K_{ad} = \frac{\cos(\alpha + \theta)}{\cos \theta \cdot \cos \alpha} \cdot K_a^*$$

El coeficiente K_a^* se obtendrá con las fórmulas que definen el coeficiente de empuje activo en condiciones estáticas (apartado 3.7.5), empleando en ellas, en el lugar de α , el ángulo $(\alpha + \theta)$ y, en el lugar de β , el ángulo $(\beta + \theta)$.

El ángulo θ será el definido por las expresiones siguientes:

$$\theta = \arctg\left(\frac{a_h}{g - a_v}\right) \quad \text{Caso 1}$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a_h}{g - a_v} \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma'}\right) \quad \text{Caso 2}$$

$$\theta = \arctg\left(\frac{a_h}{g - a_v} \cdot \frac{\gamma_{sat}}{\gamma'}\right) \quad \text{Caso 3}$$

donde:

g = aceleración de la gravedad.

a_h, a_v = aceleraciones sísmicas equivalentes horizontal y vertical. Los valores de estos parámetros se definen en el apartado 3.10.5.2.2.2.

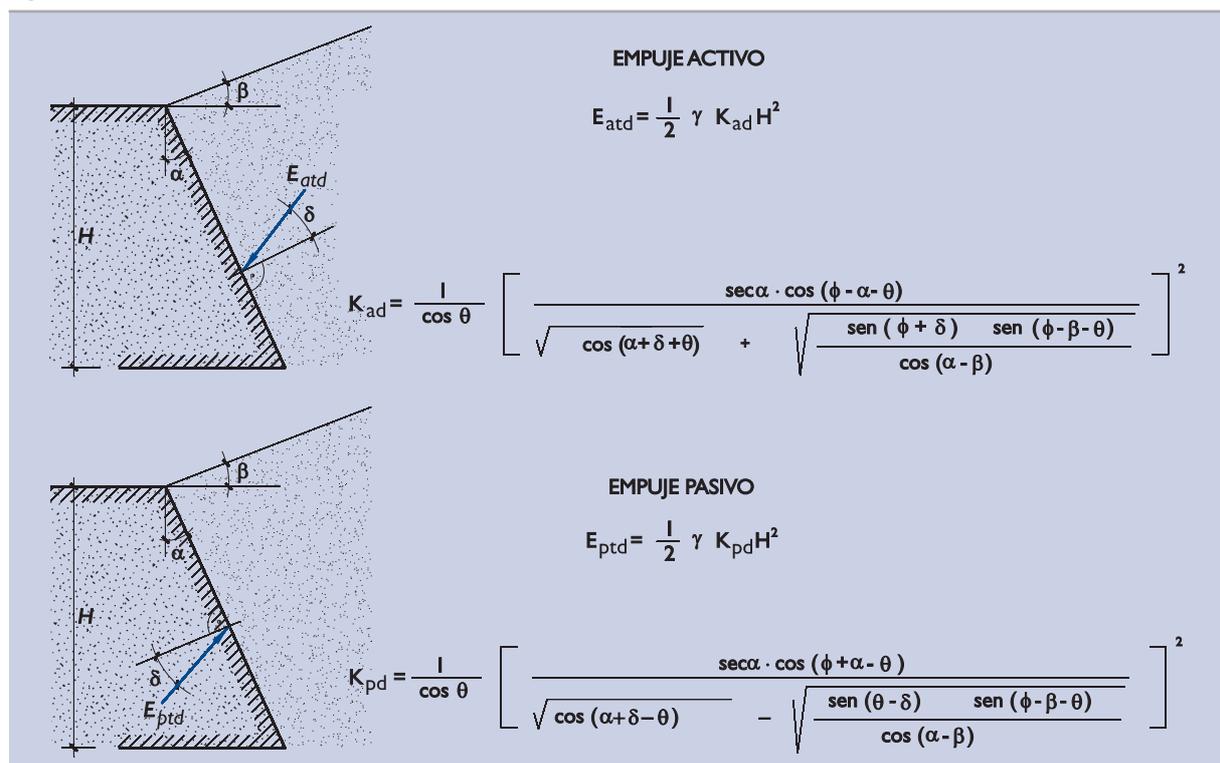
El "caso 1" corresponde a aquellos rellenos de trasdós que estén secos o parcialmente saturados, siempre situados sobre el nivel freático.

El "caso 2" corresponde a rellenos situados bajo el nivel freático y cuya naturaleza sea claramente drenante, incluso en condiciones sísmicas (escolleras, por ejemplo).

El "caso 3" corresponde a aquellos rellenos situados por debajo del nivel freático que no sean claramente drenantes.

Cuando en este proceso se emplean las fórmulas de Coulomb para el cálculo del coeficiente de empuje activo, resultan las fórmulas de Mononobe-Okabe que se recogen en la parte superior de la Fig. 3.10.9.

Figura 3.10.9. Fórmulas de Mononobe-Okabe



Una vez calculado K_{ad} , el proceso de estimación de empujes (empujes unitarios, efecto del agua, efecto de la cohesión, efecto de las sobrecargas, etc.) será, en todo, semejante al proceso descrito en 3.7.5 para el cálculo de empujes activos, aunque deben tenerse en cuenta las consideraciones que se indican a continuación.

b. Ángulo de rozamiento tierras-muro

El ángulo de rozamiento tierras-muro puede disminuir notablemente durante los terremotos. Esto significaría un aumento adicional del empuje activo.

Esta reducción de δ será tanto mayor cuanto más sensible sea el material de relleno de trasdós al efecto de las vibraciones sísmicas.

El ingeniero debe tener en cuenta esta circunstancia y reducir prudentemente el ángulo “ δ ” a utilizar en los cálculos. La hipótesis $\delta = 0$ es siempre conservadora.

c. Peso específico a utilizar en los cálculos

El cálculo del empuje efectivo debido al peso de las tierras se realizará con unos pesos específicos del terreno mayores que los reales.

El peso específico del terreno se aumentará, tanto en la zona situada por encima del nivel freático, γ_{ap} , como en la zona situada por debajo de él, γ' . En ambos casos el factor de amplificación de esos pesos específicos será:

$$f = 1 + \frac{a_v}{g}$$

d. Empuje debido al agua intersticial

El empuje del agua intersticial del relleno del trasdós, en condiciones sísmicas, se considerará igual que el calculado en condiciones estáticas.

e. Efecto de la cohesión

El posible efecto beneficioso de la cohesión puede considerarse igual que el de la situación estática; esto es, independiente de la acción sísmica.

f. Efecto de las cargas y sobrecargas en el trasdós

El efecto de las cargas y sobrecargas que pudieran existir en la zona del trasdós puede evaluarse con los mismos procedimientos de la estática que se indican en el apartado 3.7.5.

La intensidad de las sobrecargas deberá multiplicarse por el factor “f” definido en el subapartado c).

En las expresiones en las que aparezca el coeficiente de empuje activo, se debe utilizar el valor correspondiente a la situación dinámica, definido previamente.

g. Empuje del agua libre

Cuando existe agua libre en el intradós (como ocurre normalmente en los muelles portuarios), su empuje dinámico se debe considerar por algún procedimiento adecuado. A estos efectos, y como primera aproximación, se admite la hipótesis de Westergaard:

$$\Delta E_w = \pm \frac{7}{12} \frac{a_h}{g} \cdot \gamma_w h^2$$

donde:

ΔE_w = incremento de empuje de agua libre causado por el terremoto.

h = calado del agua libre.

g = aceleración de la gravedad.

γ_w = peso específico del agua.

El valor de la aceleración sísmica equivalente horizontal “ a_h ” se ha definido en el apartado 3.10.5.2.2.2.

Este incremento de empuje puede suponerse aplicado a una profundidad $0,6 h$, medida desde el nivel del agua libre.

3.10.5.2.3.2 EMPUJE PASIVO

El empuje pasivo de los muros puede disminuir durante los terremotos. El estudio de esa reducción puede hacerse por un procedimiento semejante al indicado en los párrafos precedentes.

El coeficiente de empuje pasivo en condiciones dinámicas se puede obtener mediante la expresión:

$$K_{pd} = \frac{\cos(\alpha - \theta)}{\cos \alpha \cdot \cos \theta} \cdot K_p^*$$

El ángulo " θ " sería el mismo que el definido para el caso del empuje activo pero se utilizaría para restárselo a los ángulos " α " y " β " en las fórmulas que definen el coeficiente de empuje pasivo en condiciones estáticas que se define en 3.7.7 y obtener así el correspondiente valor de K_p^* .

Cuando este procedimiento simplificado se aplica al método de Coulomb se obtiene la fórmula de Mononobe-Okabe para empuje pasivo que se indica en la Fig. 3.10.9, parte inferior. Para ángulos δ o β grandes, esta fórmula puede ser optimista.

El factor de corrección " f " utilizado para mayorar los pesos específicos se obtendría cambiando el signo de la aceleración vertical, obteniéndose así valores de " f " menores que la unidad.

El ángulo de rozamiento tierras-muro debe reducirse prudentemente, atendiendo a los mismos criterios indicados para el caso activo.

3.10.5.2.4 FUERZAS ESTÁTICAS EQUIVALENTES PARA LA VERIFICACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

El efecto sísmico en los taludes se puede analizar de la manera simplificada que se expone a continuación únicamente en los casos en que la acción sísmica no condicione de manera importante el proyecto. De otra forma sería necesario un estudio más detallado, fuera del alcance de esta ROM.

El efecto sísmico se considerará equivalente a unas fuerzas másicas iguales a:

$$\text{Fuerza horizontal} = \pm \frac{a_h}{g} \cdot \gamma \quad \text{Fuerza vertical} = \pm \frac{a_v}{g} \cdot \gamma$$

donde " γ " es el peso específico del terreno y a_h y a_v las aceleraciones sísmicas equivalentes definidas en el apartado 3.10.5.2.2.2.

Independientemente de que el cálculo de estabilidad se haga con los pesos totales y descontando después el efecto de la subpresión, o en término de pesos efectivos y sin subpresión (ver apartado 3.8.4), el valor de γ a utilizar en la expresión anterior será el peso específico aparente del terreno.

Cuando existe agua libre sumergiendo totalmente el talud, el cálculo debe realizarse por el método de los pesos sumergidos por debajo del nivel de agua libre (ver apartado 3.8.4), ya que, de otra manera, se obtendrían resultados que pueden ser excesivamente pesimistas.

En este procedimiento simplificado no se tendría en cuenta el efecto hidrodinámico del agua libre. El efecto dinámico más nocivo en la estabilidad global de la obra es, sin embargo, la debilitación de la resistencia del terreno que pueden producir las alternancias de las cargas. La susceptibilidad de los suelos a esta disminución de resistencia, ya sea por crecimiento de las presiones intersticiales o por otros motivos, deberá ser investigada. Los parámetros resistentes a utilizar en los cálculos deberán tener en consideración este efecto.

Capítulo IV
Aspectos Geotécnicos particulares
de las distintas tipologías de
Obras Marítimas y Portuarias



Índice Capítulo IV

CAPÍTULO IV. ASPECTOS GEOTÉCNICOS PARTICULARES DE LAS DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

4.1.	INTRODUCCIÓN	405
4.2.	MUELLES DE GRAVEDAD	405
4.2.1.	El terreno natural. Estudio del cimiento	406
4.2.2.	Estudio de materiales	406
4.2.3.	Estados Límite Últimos	407
4.2.3.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	408
4.2.3.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento del contacto de la banqueta de apoyo y el terreno natural	409
4.2.3.3.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	410
4.2.3.4.	Verificación de la seguridad frente al vuelco plástico	411
4.2.3.5.	Verificación de la seguridad frente a la estabilidad global	412
4.2.3.6.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna del trasdós	412
4.2.3.7.	Verificación de la seguridad frente a la socavación del pie del intradós	413
4.2.3.8.	Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	415
4.2.4.	Estados Límite de Servicio	415
4.2.5.	Otras recomendaciones	416
4.3.	MUELLES Y PANTALANES DE PILOTES	418
4.3.1.	El terreno natural. Estudio del cimiento	418
4.3.2.	Elección del tipo de pilote	419
4.3.3.	Estudio de los materiales	420
4.3.4.	Acciones sobre los pilotes	421
4.3.5.	Estados Límite Últimos	422
4.3.5.1.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento o arranque de los pilotes	422
4.3.5.2.	Verificación de la seguridad frente a la rotura horizontal del terreno	423
4.3.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la erosión del talud	424
4.3.5.4.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del talud	424
4.3.5.5.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	425
4.3.5.6.	Verificación de la seguridad frente a las erosiones internas y arrastres	427
4.3.5.7.	Verificación de la seguridad frente a las socavaciones	427
4.3.5.8.	Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	428
4.3.6.	Estados Límite de Servicio	428
4.3.7.	Otras recomendaciones	429
4.4.	MUELLES DE PANTALLAS	430
4.4.1.	Tipología básica	430
4.4.2.	Datos del terreno	431
4.4.3.	Estudio de materiales	432
4.4.4.	Comportamiento estructural	432
4.4.4.1.	Tensión en el tirante	432
4.4.4.2.	Esfuerzos en la pantalla	433

4.4.5.	Estados Límite Últimos	433
4.4.5.1.	Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del anclaje	434
4.4.5.2.	Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del pie	436
4.4.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en el entorno del anclaje	439
4.4.5.4.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento conjunto	440
4.4.5.5.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	442
4.4.5.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical	443
4.4.5.7.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	444
4.4.5.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	444
4.4.5.9.	Resumen de coeficientes de seguridad mínimos	444
4.4.6.	Estados Límite de Servicio	444
4.4.7.	Otras recomendaciones	445
4.5.	MUELLES DE RECINTOS DE TABLESTACAS	446
4.5.1.	Tipología	446
4.5.2.	Factores de proyecto	448
4.5.2.1.	Datos del terreno	448
4.5.2.2.	Estudio de materiales	448
4.5.2.3.	Niveles de agua	449
4.5.3.	Estados Límite Últimos	449
4.5.3.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento	450
4.5.3.1.1.	Cimentaciones superficiales	451
4.5.3.1.2.	Cimentaciones empotradas	452
4.5.3.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento	454
4.5.3.3.	Verificación de la seguridad frente al vuelco	455
4.5.3.4.	Verificación de la seguridad frente a la rotura de la celda	459
4.5.3.5.	Verificación de la seguridad frente a la inestabilidad local del pie	460
4.5.3.6.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas	463
4.5.3.7.	Verificación de la seguridad frente al equilibrio global	465
4.5.3.8.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	465
4.5.3.9.	Verificación de la seguridad frente a la socavación	465
4.5.3.10.	Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos	465
4.5.4.	Estados Límite Últimos del tipo agotamiento estructural	465
4.5.5.	Estados Límite de Servicio	467
4.5.6.	Otras recomendaciones	469
4.6.	DIQUES SECOS Y ESCLUSAS	470
4.6.1.	Clasificación	470
4.6.2.	Reconocimiento geotécnico	471
4.6.3.	Diques secos de gravedad	472
4.6.3.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento del dique debido a las subpresiones	472
4.6.3.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento longitudinal	473
4.6.3.3.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	474
4.6.3.4.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	474
4.6.3.5.	Movimientos	474
4.6.3.6.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.	Diques secos de solera drenada	475
4.6.4.1.	Reducción de subpresiones. Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	475
4.6.4.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	476
4.6.4.3.1.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	477
4.6.4.3.2.	Movimientos	477

4.6.5.	Diques secos de solera anclada	477
4.6.5.1.	Verificación de la seguridad frente al levantamiento de la solera	477
4.6.5.2.	Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera	478
4.6.5.3.	Verificación de la seguridad de los muros cajeros	479
4.6.5.4.	Movimientos	479
4.6.5.5.	Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones	479
4.6.6.	Esclusas de navegación	479
4.6.7.	Estudio de la construcción	479
4.7.	DIQUES DE ABRIGO	479
4.7.1.	Tipos de diques	480
4.7.2.	Información geotécnica	483
4.7.2.1.	Reconocimiento del cimiento	483
4.7.2.2.	Estudio de materiales de préstamo	483
4.7.3.	Verificación de la seguridad frente a los modos de fallo de tipo geotécnico	486
4.7.3.1	Elección de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo geotécnico	487
4.7.3.2	Elección del procedimiento de verificación para cálculos de Nivel I	487
4.7.4.	Diques en talud emergido	490
4.7.4.1.	Verificación de la seguridad frente a la rotura del manto principal	490
4.7.4.2.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del manto	491
4.7.4.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del espaldón	492
4.7.4.4.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad de la berma	492
4.7.4.5.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global	493
4.7.4.5.1	Estabilización con bermas	495
4.7.4.6.	Verificación de la seguridad frente a la erosión interna	496
4.7.4.7.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del núcleo del dique	496
4.7.4.8.	Verificación de la seguridad frente a la socavación del fondo natural	497
4.7.4.9.	Coeficientes de seguridad mínimos	498
4.7.4.10.	Asientos	499
4.7.5	Diques verticales	499
4.7.5.1.	Verificación de la seguridad frente al deslizamiento horizontal de la estructura	501
4.7.5.2.	Verificación de la seguridad frente al hundimiento, la plastificación local y el vuelco plástico	501
4.7.5.3.	Verificación de la seguridad frente a la pérdida de la estabilidad global	503
4.7.5.4.	Verificación de la seguridad frente a las socavaciones y erosiones	503
4.7.5.5.	Asientos y deformaciones	503
4.7.5.6.	Coeficientes de seguridad mínimos	504
4.8.	PLATAFORMAS MARINAS (OFF-SHORE)	505
4.8.1.	Tipologías	505
4.8.2.	Acciones del oleaje y del viento	506
4.8.3.	Reconocimientos geotécnicos	507
4.8.4.	Estabilidad del fondo	507
4.8.5.	Cimentaciones superficiales	507
4.8.5.1.	Análisis estático	508
4.8.5.2.	Análisis dinámico	510
4.8.6.	Cimentaciones profundas	511
4.8.6.1.	Estudio de la hinca	511
4.8.6.2.	Carga de hundimiento	512
4.8.6.3.	Carga de rotura horizontal del terreno	512
4.8.6.4.	Deformabilidad	512
4.8.6.5.	Esfuerzos en los pilotes	513

4.9	DRAGADOS Y RELLENOS	513
4.9.1.	Tipos de dragados	513
4.9.2.	Información geotécnica	514
4.9.2.1.	Reconocimiento del terreno	514
4.9.2.2.	Clasificación de los terrenos a dragar	515
4.9.3.	Taludes de dragado	517
4.9.4.	Tipos de relleno	520
4.9.5.	Características de los rellenos	521
4.9.5.1.	Rellenos sumergidos de vertido directo	521
4.9.5.2.	Rellenos hidráulicos	522
4.9.5.3.	Rellenos en seco	523
4.9.6.	Consolidación de los rellenos	524
4.9.6.1.	Asiento de los rellenos generales	524
4.9.6.2.	Procedimiento de observación	524
4.9.7.	Otras recomendaciones	527
4.9.7.1.	Selección de rellenos	527
4.9.7.2.	Precauciones en la realización de dragados	528
4.9.7.3.	Precauciones en la ejecución de los rellenos	528
4.9.7.4.	Estudio de los vertidos	529
4.10	OTRAS OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS	529
4.10.1.	Diques de alba	529
4.10.1.1.	Tipologías	529
4.10.1.2.	Problemas geotécnicos asociados	530
4.10.2.	Instalaciones de botadura e izado	531
4.10.2.1.	Gradas	531
4.10.2.2.	Varaderos	532
4.10.2.3.	Ascensores y cajoneros	532
4.10.3.	Tinglados, almacenes y parques cubiertos	532
4.10.4.	Emisarios y conducciones submarinas	533
4.10.4.1.	Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento	534
4.10.4.2.	Procedimientos de instalación	535

4.1 INTRODUCCIÓN

Cada tipología de obra marítima y portuaria tiene, desde el punto de vista geotécnico, ciertas singularidades. En esta Parte 4 de la ROM 0.5 se destacan los aspectos más significativos de algunos de los tipos de obras más frecuentes.

Si todo el Programa ROM está concebido como una actividad viva y permanente, pensando en posibles revisiones y ampliaciones, eso es especialmente aplicable a esta Parte 4, que se edita en una versión que se cree reducida y que se piensa completar, a medida que avance el Programa ROM en su conjunto.

No se ha querido, sin embargo, dejar de recomendar una primera serie de ideas aplicables a las distintas tipologías de obras marítimas y portuarias que pueden ayudar al ingeniero en sus tareas de proyecto.

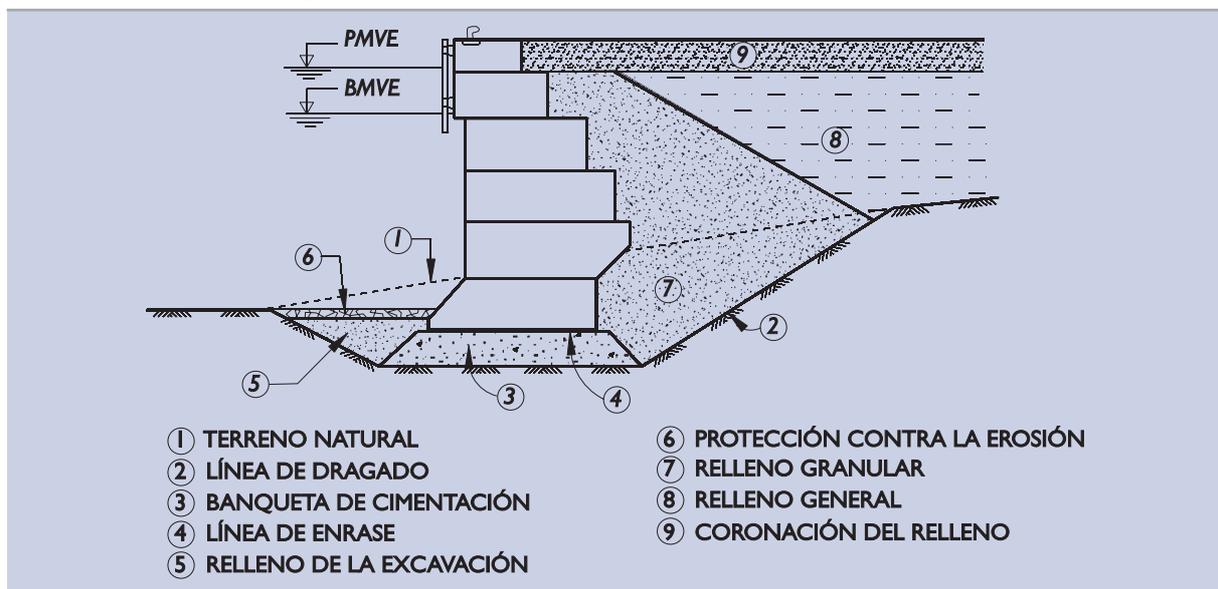
4.2 MUELLES DE GRAVEDAD

Los muelles de gravedad son estructuras de atraque que soportan el desnivel de tierras de trasdós a intradós fundamentalmente mediante el peso propio de su estructura.

Las tipologías más usuales en España son la denominada “de bloques”, la de “cajones” y la de “hormigón sumergido”. Otras formas especiales, como la de recintos de tablestacas, que también soportan los empujes de tierras por gravedad, se consideran más adelante, en el apartado 4.5, ya que la utilización de ese elemento constructivo las hace singulares.

Los muelles de bloques tienen una estructura general como la representada en la Fig. 4.2.1. Los elementos más característicos, desde el punto de vista geotécnico, son los indicados en dicha figura.

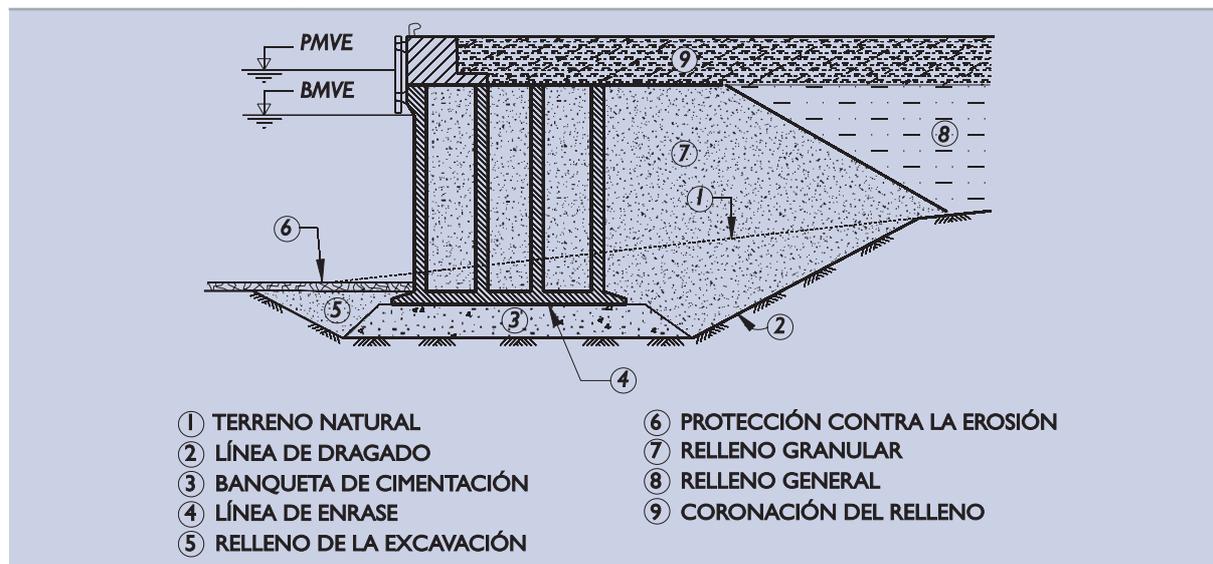
Figura 4.2.1. Muelle de bloques



Los muelles de bloques pueden construirse, también, con piezas aligeradas o con chimeneas huecas, que posteriormente se macizan.

En la Fig. 4.2.2 se indica, de manera similar, la estructura típica y los elementos geotécnicos característicos de un muelle de cajones.

Figura 4.2.2. Muelle de cajones



Los cajones para construir los muelles suelen ser de fondo plano cerrado, como se indica en la figura, pero pueden tener otro tipo de fondo para adecuarlo al terreno de cimentación. Es posible, en aquellos cimientos que se quieren excavar tras el fondeo del cajón, dejar una cámara en su base formada por las paredes laterales y un techo, que sería el fondo elevado del cajón.

4.2.1 El Terreno natural. Estudio del cimiento

El elemento principal, que determinará la viabilidad de este tipo de solución, es el terreno natural. Los muelles de gravedad, dado su carácter, han de transmitir presiones elevadas al cimiento; los suelos blandos, en general, no son aptos para soportar este tipo de muelles.

El reconocimiento del terreno para proyectar este tipo de obras es fundamental. Es necesario conocer la resistencia y la deformabilidad del terreno en la zona afectada por la obra. En la Parte 2 de esta ROM se dan recomendaciones a este respecto.

El reconocimiento del terreno debe estar encaminado, también, al estudio del posible dragado. Este puede ser necesario para conseguir el calado requerido o para preparar el cimiento, eliminando los suelos superficiales más blandos.

4.2.2 Estudio de materiales

En el proyecto del muelle intervienen, además del terreno natural, otros materiales: que tendrán una influencia apreciable en el futuro comportamiento.

El relleno del trasdós puede estar formado por varios materiales: uno, en contacto directo con la estructura del muelle, que normalmente será granular y otro relleno general, más alejado, que puede ser de distinta naturaleza (aunque también puede ser necesario que cumpla ciertas condiciones). Por encima del nivel del agua y coronando a los anteriores, puede existir un tercer tipo de material de relleno.

Estos tres materiales (o más que pudiera haber en un determinado proyecto) han de ser caracterizados desde el punto de vista geotécnico para conocer su granulometría, su densidad seca, su índice de poros, su resistencia al corte, su permeabilidad y, en ocasiones, su deformabilidad.

Es conveniente conocer, con ensayos específicos de resistencia al corte, cuáles son los parámetros resistentes de los rellenos próximos al muelle y que intervienen en su estabilidad en condiciones de densidad similares a las que se esperan tras su puesta en obra. La aproximación de sus propiedades por vía indirecta, mediante tablas de valores aproximados (como la que se incluye en el apartado 4.9) o mediante correlaciones indirectas, será, en general, conservadora y por eso la realización de ensayos específicos puede redundar en un cierto beneficio.

Los materiales de la banqueta de cimentación, así como de los posibles materiales para protección contra la erosión, estarán formados, en general, por fragmentos de roca (todo-uno, escolleras). De ellos interesa conocer, principalmente, la naturaleza de la roca, su resistencia a compresión simple y su alterabilidad, así como la granulometría con que piensa utilizarse. En función de esas propiedades, podrá evaluarse indirectamente la resistencia al corte de las banquetas de apoyo, la permeabilidad y su compresibilidad y se podrá juzgar también sobre su durabilidad.

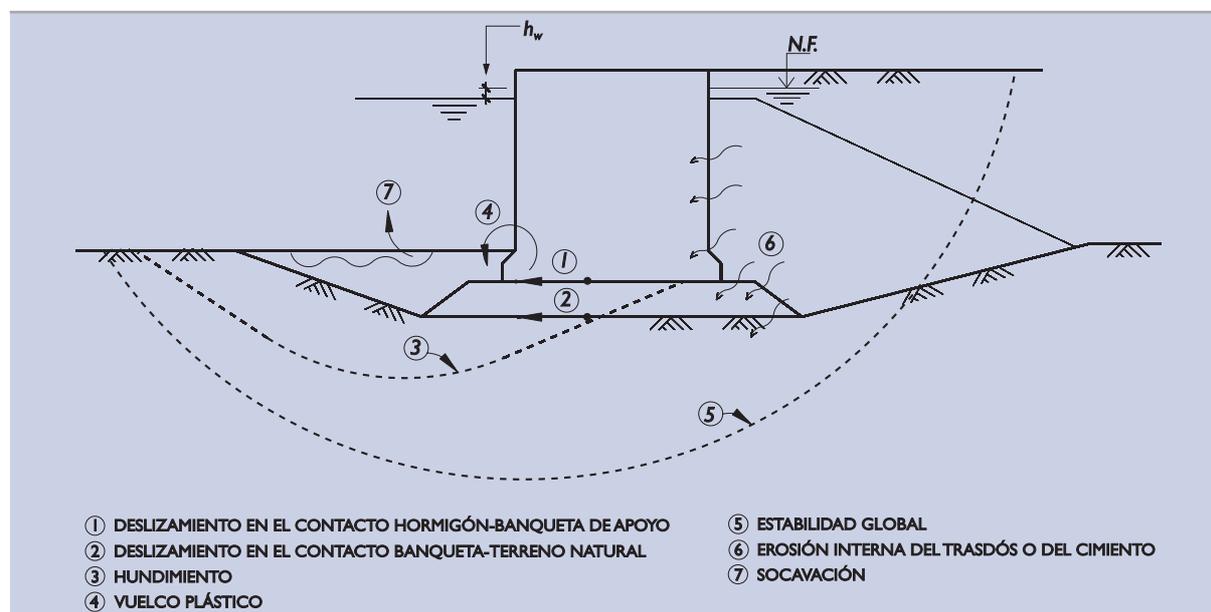
En aquellos casos en los que la resistencia de la banqueta de apoyo sea determinante del proyecto, pueden ser convenientes ensayos especiales para determinar esa resistencia, tales como ensayos de corte con muestras de gran tamaño.

En el apartado 4.7.2.2 se hacen unas consideraciones complementarias sobre la resistencia al corte de las escolleras que el ingeniero debe conocer.

4.2.3 Estados Límite Últimos

Dentro de las comprobaciones teóricas a realizar en la Fase de proyecto deben incluirse todas aquéllas encaminadas a comprobar que no se sobrepasa ningún Estado Límite Último, entre ellos, los que se indican en la Fig. 4.2.3 y se comentan a continuación.

Figura 4.2.3. Modos de fallo geotécnicos en muelles de gravedad



Nota: Sólo se incluyen modos de fallo de tipo geotécnico, esto es, controlados, principalmente, por las características del terreno.

Para verificar la seguridad frente a cualquiera de los modos de fallo es preciso definir los correspondientes factores de proyecto: la geometría del problema, las acciones y sus combinaciones y las propiedades del terreno. Este proceso de definición quedará guiado por las recomendaciones que se indican en la Parte 3, especialmente en el apartado 3.3.5.

Como aspecto significativo de las acciones y de la geometría del problema, deben definirse los niveles de agua de cálculo en el trasdós y en el intradós del muelle, pues estos niveles son importantes a la hora de verificar la seguridad de la obra. Para ello se tomará en consideración lo indicado en el apartado 3.4.4.1.

En general, la condición más desfavorable será la de bajamar y considerando en el relleno del trasdós el des-nivel límite que pueda existir respecto a dicho nivel de las aguas exteriores. En estos casos, los niveles representativos a adoptar para las aguas exteriores será función del tipo de combinación de acciones considerado de acuerdo con lo dispuesto en la Tabla 3.3.1. de esta Recomendación.

El desfase del nivel de agua entre el lado agua y el nivel freático del terreno de trasdós (valor de h_w en Fig. 4.2.3) deberá fijarse en función de un estudio detallado de la red de flujo transitorio correspondiente (ver apartado 3.4.) o de la existencia de datos estadísticos o experimentales relevantes. Simplificadamente, los casos más usuales se consigan en la Tabla 3.4.1. en función de las oscilaciones de largo periodo de las aguas libres y de la permeabilidad de cimientos, rellenos y obra.

En general la superficie del nivel freático en el trasdós no será plana y así lo puede considerar el proyectista. En el apartado 3.7 se indica cómo se pueden calcular empujes de tierras cuando la línea de presión intersticial nula no es plana.

En la mayoría de los casos será posible asimilar la situación del nivel freático en el trasdós a un plano y suponer un empuje hidrostático del agua a ambos lados del muelle y una subpresión lineal en la base de la estructura. El ingeniero debe decidir sobre este extremo. Normalmente la simplificación mencionada deja del lado de la seguridad.

La presencia del oleaje dentro del puerto que pueda afectar a los muelles se tendrá en cuenta en los cálculos. Afectará al nivel libre del agua y podría modificar sus empujes sobre el muelle. Salvo circunstancias especiales se supondrá que el posible oleaje no modifica el valor de la ubicación del nivel freático en el trasdós.

El deslizamiento entre los bloques de los muelles de gravedad es un Estado Límite Último controlado fundamentalmente por la resistencia estructural del contacto entre hormigones. Por ese motivo se considera que no es un tema geotécnico y, por lo tanto, queda fuera del alcance de esta ROM 0.5.

De igual forma, en el caso de muelles de cajones, normalmente la superestructura está unida con elementos estructurales al propio cajón. De otra forma, deberá comprobarse que el deslizamiento a lo largo de esa junta no ocurre. Este problema también es de tipo estructural y, por lo tanto, se considera fuera del alcance de esta ROM 0.5.

4.2.3.1 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo

Normalmente la banquetta de apoyo estará coronada por un material granular con resistencia al corte elevada (en general será una “grava de enrase”), pero el rozamiento en el contacto hormigón prefabricado-banqueta debe considerarse menor que el del material granular que forma el enrase, tal como se indica en el apartado 3.5.5.2. En cualquier caso la resistencia al corte de los materiales que forman el enrase y la banquetta serán datos necesarios para verificar la seguridad frente a este tipo de rotura.

Los criterios recomendados para realizar esta verificación, así como los valores mínimos de los coeficientes de seguridad, se recogen en el apartado 3.5.5 de esta ROM.

A efectos de calcular los empujes activos de las tierras del trasdós se seguirán las recomendaciones indicadas en el apartado 3.7 de esta ROM.

En caso de desearse mejorar las condiciones respecto a este Estado Límite Último, se pueden realizar inyecciones de morteros de arena y cemento en esta zona de contacto o disponer otras medidas especiales (bases artificiales de alta fricción, rellenos de hormigón “in situ” o mortero en esta zona de contacto, etc.).

4.2.3.2 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento del contacto de la banqueta de apoyo y el terreno natural

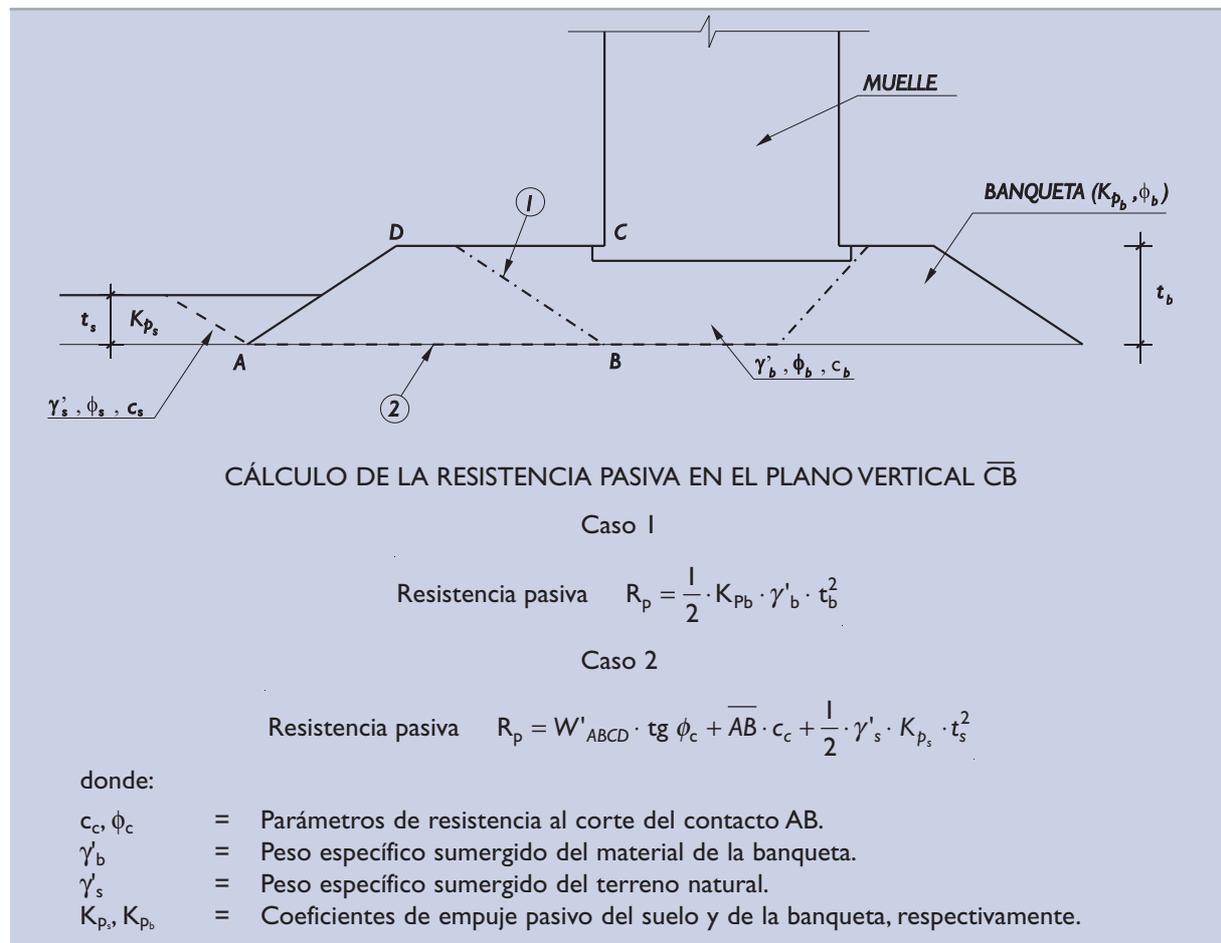
Cuando el terreno natural tenga una resistencia al corte menor que la correspondiente a la zona de contacto de la estructura del muelle con la banqueta de enrase, será necesario comprobar que existe suficiente seguridad frente a un deslizamiento plano más profundo, por la zona de contacto del terreno natural con la banqueta.

En esta comprobación se supondrá que, sobre el muelle y sobre la banqueta, actúa el empuje activo de las tierras del trasdós, aparte de las demás acciones que correspondan en cada situación de proyecto (o combinación de acciones).

A efectos de calcular los empujes activos de las tierras del trasdós se seguirán las recomendaciones indicadas en el apartado 3.7 de esta ROM.

En el lado de intradós se optará por una de las dos alternativas siguientes para calcular la resistencia pasiva (ver Fig. 4.2.4).

Figura 4.2.4. Esquema del deslizamiento por la base de la banqueta



1. Línea de rotura atravesando de manera ascendente la banqueta. En este caso se añadirá como resistencia el empuje pasivo de la banqueta.
2. Línea de rotura prolongada a lo largo del contacto banqueta-terreno natural. Se añade el empuje pasivo del suelo.

De estas dos opciones se elegirá la que conduzca a un menor coeficiente de seguridad.

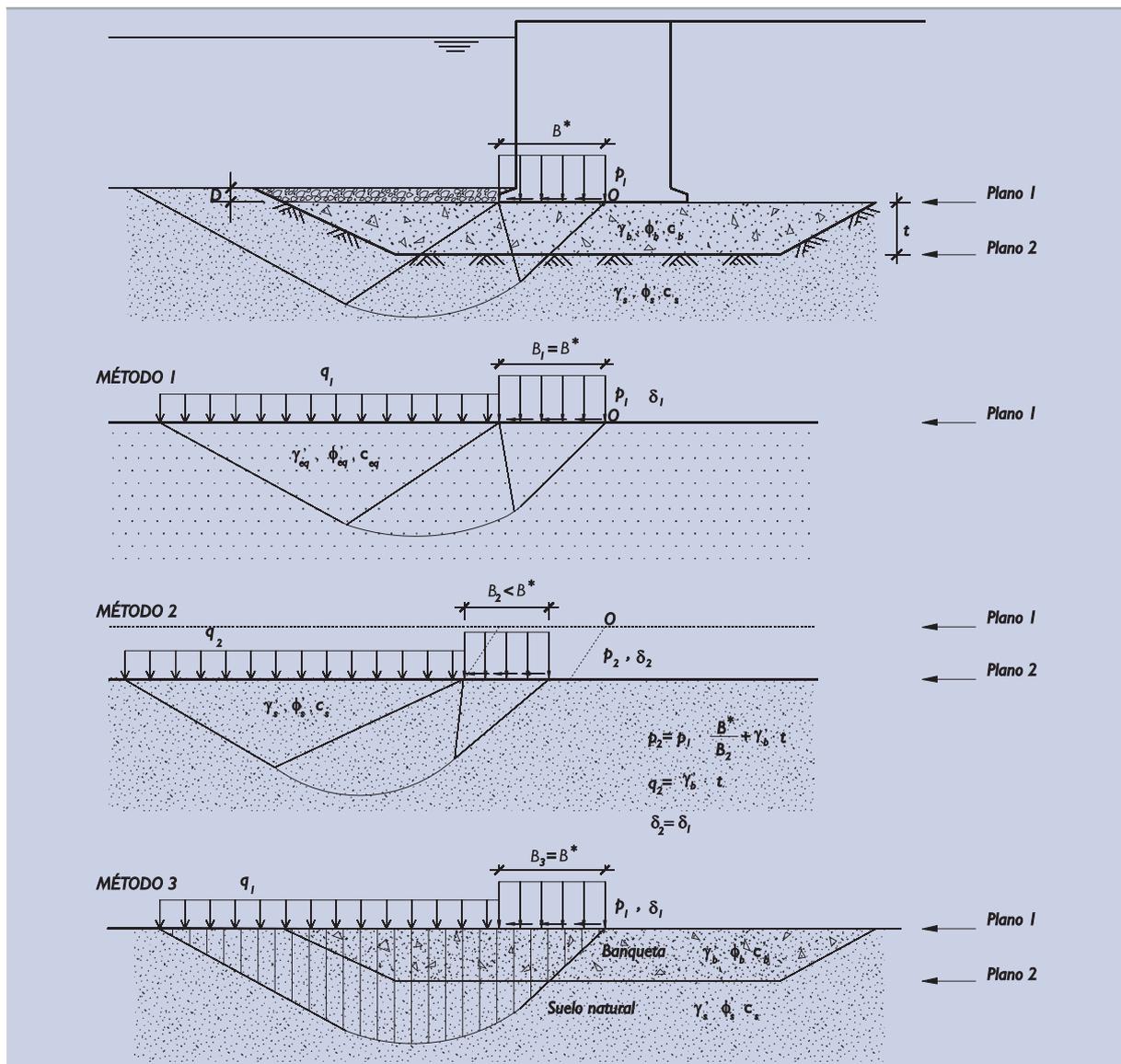
Los coeficientes de seguridad mínimos requeridos frente a este modo de fallo son los indicados en la Tabla 4.2.1.

4.2.3.3 Verificación de la seguridad frente al hundimiento

La comprobación de la seguridad frente al hundimiento se realizará siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado 3.5, correspondiente a cimentaciones superficiales.

Debido a la presencia de la banqueta, el cálculo de la carga de hundimiento corresponderá al de un terreno con dos niveles de resistencia claramente distinta. El cálculo detallado de la carga de hundimiento mediante la teoría de la plasticidad es complejo. Por eso se considera admisible utilizar alguno de los procedimientos simplificados que se indican en la Fig. 4.2.5.

Figura 4.2.5. Métodos simplificados de cálculo de la carga de hundimiento de un muelle de gravedad sobre una banqueta



MÉTODO 1. TERRENO HOMOGÉNEO EQUIVALENTE

En este procedimiento simplificado, la banqueta y el terreno natural son representados por un terreno homogéneo equivalente, cuyas características resistentes (γ_{eq} , c_{eq} y $\text{tg } \phi_{eq}$) son la media ponderada de las correspondientes a esos materiales según se indica en 3.5.4.8.4.

Este método es adecuado para cálculos en los que el ángulo de rozamiento del terreno natural es significativo (cálculos con cimientado drenado). Para cálculos no drenados, en los que el ángulo de rozamiento del terreno se supone $\phi = 0$, la obtención de un ángulo de rozamiento equivalente no es adecuada. Para realizar cálculos de carga de hundimiento en esas situaciones debe utilizarse el método 2 o el 3 o realizar cálculos con modelos numéricos adecuados.

MÉTODO 2. DESCENSO DE CARGAS AL PLANO DE BASE DE LA BANQUETA

Para practicar este método no sólo han de calcularse las cargas activas equivalentes y las cargas pasivas correspondientes sino también definir un ancho de cimentación adecuado en el plano 2.

A falta de otra información se podrá suponer $B_2 = B^* - 1/2 t \geq 0,5 B^*$.

Cuando se trata de realizar cálculos en condiciones no drenadas, suponiendo que el suelo tiene un ángulo de rozamiento nulo ($\phi = 0$) la elección del valor de B_2 es también importante (posibles situaciones de crecimiento de la cohesión con la profundidad), pero no tan decisivo como para el caso de análisis drenados ($\phi \neq 0$)

El valor del ángulo, δ , de inclinación de la carga en superficie se considerará constante en este proceso virtual de descenso de cargas.

El método del descenso de carga es poco adecuado para el cálculo de la carga de hundimiento en condiciones drenadas. En esas circunstancias es preferible el método 1.

Para el caso de rotura sin drenaje ($\phi = 0$) se puede aplicar el procedimiento algo más detallado en el apartado 3.5.4.8.5, donde se estiman con alguna precisión mayor los valores más adecuados de p_2 que conviene utilizar.

MÉTODO 3. UTILIZACIÓN DE MÉTODOS DE REBANADAS

La carga de hundimiento se puede determinar mediante el uso de métodos de rebanadas tanteando líneas de rotura que pasen por el punto 0.

Los detalles sobre la forma de proceder en este caso y la posible precisión de este método se comentan en el apartado 3.8.4.

Aunque el método 3 siempre debe aplicarse, esto no debe excluir que se utilice además, el método 1 (cimientados drenados) o el método 2 (cimientado sin drenaje). La comparación de resultados permite precisar mejor el resultado.

En todo caso, salvo que se trate de una situación clara, es aconsejable también realizar un modelo numérico para verificar este modo de fallo.

4.2.3.4 Verificación de la seguridad frente al vuelco plástico

El cálculo detallado de los muelles de bloques permite obtener la situación del punto de paso de la resultante de la acción de la parte alta del muelle sobre la cara superior de cada uno de los bloques.

El vuelco de los bloques del muelle respecto a otro bloque inferior es un problema estructural que se considera fuera del alcance de esta ROM.

El vuelco, respecto a un punto próximo al pie del muelle en el intradós (lado mar), deberá estudiarse de la manera indicada en 3.7.11.1.2 y el coeficiente de seguridad resultante no será inferior al recomendado en la Tabla 4.2.1.

En esta ROM, el mecanismo o modo de fallo denominado vuelco está controlado por las mismas ecuaciones que definen el hundimiento. La diferencia entre hundimiento y vuelco estriba en que, en el primer caso, la rotura se produciría al aumentar simultáneamente las cargas horizontales y verticales. En el segundo caso se produciría sólo un aumento de las cargas horizontales. Como consecuencia, la acción que provocaría el vuelco sería más inclinada y más excéntrica y, por tanto, el ancho B^* sería más reducido y la penetración en profundidad de la línea de rotura sería menor.

Teniendo esto en mente, los mismos procedimientos de cálculo que se han indicado para el estudio simplificado del hundimiento de muelles son aplicables al caso del vuelco. Ver Fig. 4.2.5.

4.2.3.5 Verificación de la seguridad frente a la estabilidad global

Los mecanismos de rotura considerados en los puntos anteriores se refieren a roturas próximas a los planos más débiles y más cercanos a la estructura de los muelles de gravedad. Es posible, sin embargo, que líneas de rotura algo más alejadas de la propia estructura resulten más críticas.

La rotura según superficies que engloben todo el muelle debe analizarse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.8, cumpliéndose los requisitos mínimos de seguridad que allí se indican.

Dentro de estos mecanismos de pérdida del equilibrio global en muelles de gravedad, quiere citarse expresamente el deslizamiento profundo a lo largo de algún posible estrato débil del terreno. Es posible que una zona débil de pequeño espesor sea compatible con una seguridad razonable frente a los mecanismos de hundimiento, vuelco y deslizamiento enunciados en los apartados anteriores. Un mecanismo de rotura que suponga una buena parte de la línea de deslizamiento dentro de esas posibles zonas débiles puede requerir el análisis de estabilidad global según líneas no circulares, con un fondo plano en el nivel más débil, que se debe realizar siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.8.

4.2.3.6 Verificación de la seguridad frente a la erosión interna del trasdós

El movimiento del agua, ya sea debido al oleaje o a las mareas, alrededor del muelle puede provocar arrastres de materiales del trasdós, de la banquetta o incluso del cimientó. Este proceso, si no se controla, puede inducir daños en la explanada e incluso en el muelle.

La seguridad contra este tipo de rotura no es cuantificable mediante procedimientos de cálculo sencillos o bien establecidos y, por lo tanto, tal seguridad debe conseguirse mediante medidas preventivas de proyecto.

Deben identificarse, a la hora de proyecto, los posibles caminos del flujo de agua y disponerse las granulometrías de los materiales de tal forma que en los contactos entre distintos materiales se cumplan siempre las condiciones de filtro indicadas en el apartado 3.4.7.

Son especialmente peligrosas las juntas verticales entre los cajones, que deben dotarse de elementos de estanqueidad (o de contención de arrastres) especiales.

Las juntas entre bloques, en los muelles de estas tipologías, no pueden ser impermeabilizadas con garantía. Por ello, en el contacto del muelle con el terreno de trasdós, deben disponerse medidas antiarrastre específicas.

4.2.3.7 Verificación de la seguridad frente a la socavación del pie del intradós

El fenómeno de socavación del pie delantero de los muelles de gravedad es, probablemente, la causa principal de su deterioro a largo plazo.

La socavación del pie delantero puede producirse por varias causas, entre ellas:

- ◆ Corrientes de arrastre.
- ◆ Dragados artificiales próximos.
- ◆ Efecto de las hélices, especialmente las transversales, en las zonas de atraque.
- ◆ Efecto del oleaje.

Los procesos erosivos son especialmente importantes en los extremos de los muelles. Las velocidades del arrastre pueden aumentar en esos bordes.

La socavación podría llegar a afectar a la parte delantera del plano de apoyo del cimiento, reduciendo así el ancho efectivo de cimentación.

La socavación reduce la presión vertical en la zona pasiva que da seguridad a la estructura frente al hundimiento (reducción de la carga de cálculo «q» en la fórmula recomendada para la evaluación de la carga de hundimiento en el apartado 3.5.4.8).

Como consecuencia de todo ello, la socavación puede inducir la ruina de la obra.

Para tener seguridad suficiente frente a este problema se deben disponer medidas preventivas. Entre ellas, pueden citarse:

- ◆ Disponer capas de escollera u otros materiales no erosionables en las zonas de erosión potencial.
- ◆ Prohibición y control de dragados que pudieran afectar al pie delantero del muelle.
- ◆ Control batimétrico regular delante del cantil del muelle.

Si la protección contra la erosión se realiza con escollera, cuando el problema sea importante y salvo justificación adecuada, ésta tendrá tamaños con pesos adecuados al caso y se dispondrá en un espesor mínimo del orden de $2D_{50}$, no menor que 1,50 m y en dos capas, en una anchura no menor que el calado del muelle.

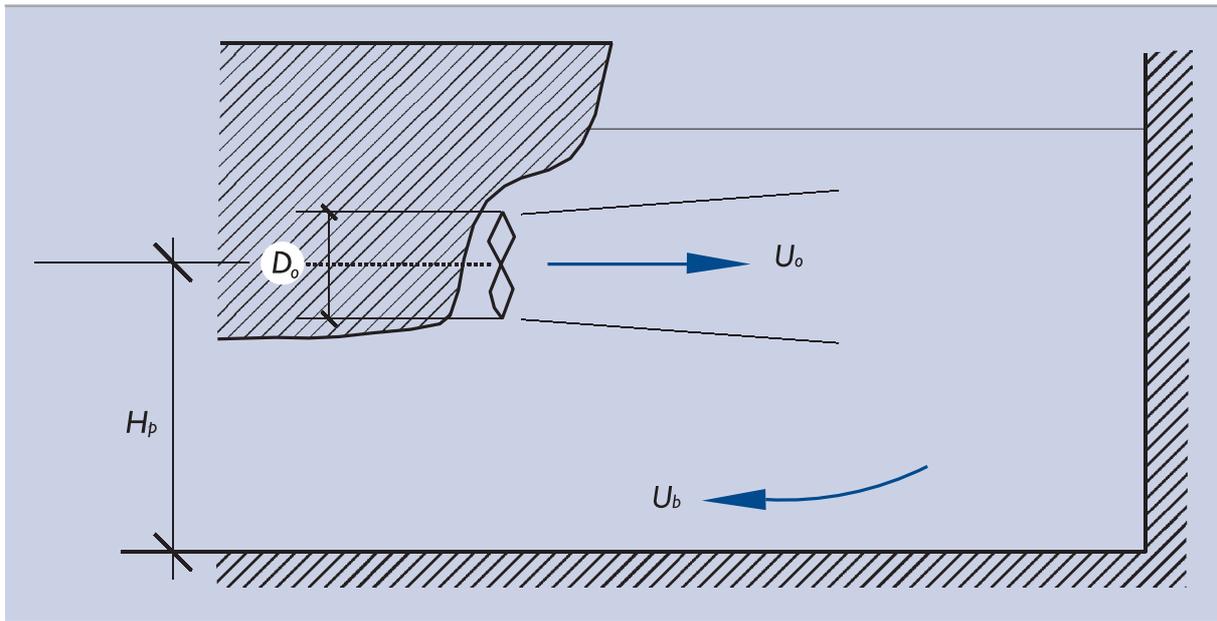
La acción erosiva de las hélices de los barcos, especialmente las hélices transversales durante las maniobras de atraque, puede ser muy importante. Las velocidades del movimiento del agua cerca de las hélices pueden ser del orden de 10 a 15 m/s. Cerca de las estructuras pueden alcanzarse valores altos. Las juntas de los muelles de gravedad (entre bloques o entre cajones) pueden ser dañadas. Este aspecto debe vigilarse especialmente.

En el fondo portuario las velocidades del agua suelen ser ya sólo una fracción del máximo indicado pero, aun así, la erosión se producirá cuando los suelos sean poco resistentes a la erosión. En el apartado 3.4.9 se hacen algunos comentarios sobre la resistencia a la erosión de algunos terrenos.

La determinación de las velocidades del agua en el entorno de interés debida a los diferentes agentes causantes (efecto de hélices, oleaje, corrientes,...) es posible pero se escapa del alcance de esta ROM, pudiéndose encontrar en la ROM 3.1 y en la bibliografía especializada. La determinación de la velocidad del agua en el fondo es necesaria sin embargo para poder proyectar una solución que impida que el proceso se desarrolle.

Existen buen número de fórmulas que permiten dimensionar las protecciones necesarias para evitar que se produzca la erosión. El ingeniero debe buscar en los documentos específicos del Programa ROM los procedimientos de análisis más adecuados a su caso. En este sentido, en el apartado 4.7 de esta ROM se indican también algunas recomendaciones que puedan usarse en la solución de este problema, cuando es el oleaje o la corriente el agente causante de la erosión.

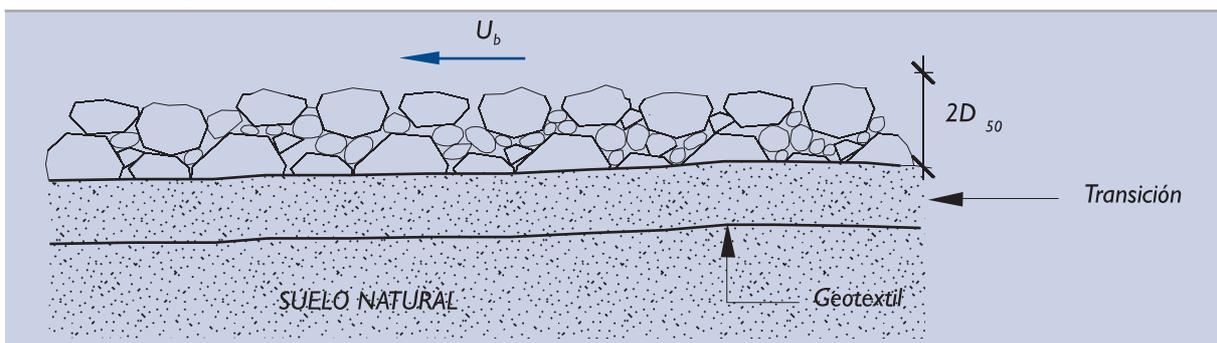
Figura 4.2.6. Esquema de la acción erosiva de la hélices



De entre los posibles sistemas de protección, además del indicado en Fig. 4.2.7, se deben mencionar otros usados con cierta frecuencia.

- ◆ Grandes bloques de escollera.
- ◆ Losas de hormigón (que suelen articularse e ir unidas con pasadores).
- ◆ Colchones de material sintético rellenos de hormigón.
- ◆ Gaviones.

Figura 4.2.7. Esquema de una protección antierosiva



Tamaños recomendables en función de la velocidad

U_b (m/s)	D_{50} (m)
1	0,05
2	0,20
3	0,40
4	0,70
5	1,10
6	1,60

En ocasiones se utilizan soluciones activas, que modifican el movimiento del agua (deflectores).

En fondos granulares gruesos o en rellenos granulares artificiales de tamaño medio-alto podría pensarse en no disponer medidas antierosión. En ese caso conviene estimar la profundidad que ésta podría alcanzar. Para ello, el ingeniero debe consultar la experiencia local o las fuentes bibliográficas.

Comentario: En caso de no disponerse ninguna protección la profundidad máxima de remoción del terreno del fondo, cuando éste está formado por suelos granulares gruesos, puede estimarse mediante la expresión aproximada:

$$Z_{\text{máx}} = \frac{1}{250} \cdot \left(\frac{F_o}{H_p / D_o} \right)^{2,9} \cdot H_p$$

donde:

$Z_{\text{máx}}$ = profundidad máxima de erosión.

F_o = número de Froude, dado por:

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g \cdot D_s (G-1)}}$$

U_o = velocidad del agua a la salida de las hélices.

G = peso específico relativo de las partículas del terreno.

g = aceleración de la gravedad.

D_s = diámetro representativo de los granos del suelo. Usualmente D_{50} .

H_p, D_o = dimensiones indicadas en Fig. 4.2.6.

La fórmula es poco precisa cuando se usa fuera del rango $0,1 \text{ m} < D_s < 0,3 \text{ m}$

Ver G.P.Tsinker "Marine structures engineering". Chapman and Hall. 1995.

El ingeniero considerará explícitamente el problema de la socavación del pie de los muelles de gravedad y justificará que las medidas adoptadas proporcionan una seguridad razonable frente a este problema.

4.2.3.8 Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos

Los procedimientos de análisis y coeficientes de seguridad que el ingeniero debe adoptar en el proyecto de muelles de gravedad, para asegurar que cada uno de los Estados Límite Últimos no se sobrepasa, están definidos en la Parte 3 de esta ROM.

Al describir, en los apartados precedentes, cada uno de los Estados Límite Últimos se ha hecho una referencia puntual al apartado de la ROM donde se define el procedimiento de cálculo y el coeficiente de seguridad a adoptar. Ambos aspectos (método de cálculo y coeficiente de seguridad) están ligados y no deben dissociarse. Se adjunta a continuación la Tabla 4.2.1, donde se resumen los coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a cada modo de fallo, para obras con ISA bajo. El ingeniero debe conocer el método de análisis asociado antes de utilizarlos.

4.2.4 Estados Límite de Servicio

Los muelles de gravedad, proyectados con los criterios de seguridad indicados en esta ROM, pueden experimentar deformaciones importantes, que el ingeniero deberá estimar y comprobar que son compatibles con el servicio al que se dedica el muelle.

En los apartados 3.5.7 y 3.7.11.2 se dan recomendaciones sobre el procedimiento que debe seguir el ingeniero en la estimación de movimientos de las estructuras de contención de gravedad. Esas recomendaciones son directamente aplicables al tipo de muelles que se viene considerando.

Tabla 4.2.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de gravedad. ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.5.5	Deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	1,5	1,3	1,1
3.5.5	Deslizamiento en el contacto de la banquetta y el terreno natural	1,5	1,3	1,1
3.5.4	Hundimiento	2,5	2	1,8
3.5.6 y 3.7.11.3	Vuelco plástico	1,5	1,3	1,1
3.8	Estabilidad global	1,4	1,3	1,1
–	Erosión interna del trasdós	MP	–	–
–	Socavación del pie del intradós	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.2 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de adecuar los coeficientes de seguridad recomendados.

Nota 3: Los coeficientes de seguridad indicados frente al hundimiento corresponden al uso de la fórmula polinómica (apartado 3.5.4.8) o al uso de métodos de rebanadas. Para otros métodos se usarán los coeficientes de seguridad mínimos que se indican en la Tabla 3.5.6.

Los muelles cuya utilidad exija pequeñas deformaciones pueden requerir medidas especiales de proyecto y procedimientos más detallados para el cálculo de deformaciones.

4.2.5 Otras recomendaciones

Aparte de las Recomendaciones que puedan darse respecto al proyecto de muelles de gravedad en otras partes del Programa ROM, se avanza, en esta ROM 0.5, algunas recomendaciones generales relacionadas con los aspectos geotécnicos de estas obras.

Banquetas de enrase

La calidad de la roca a utilizar para las escolleras de la banquetta de enrase influye en varios aspectos, tales como la durabilidad y la resistencia a la rotura de los contactos entre distintos fragmentos. Con rocas sanas y resistentes ($q_u > 100 \text{ MN/m}^2$) podrán usarse presiones de contacto estructura-banqueta mayores (σ_{pico} de hasta 1 ó 2 MN/m^2) que con rocas de resistencia moderada o baja ($q_u < 50 \text{ MN/m}^2$), en las que conviene limitar esas presiones de contacto ($\sigma_{\text{pico}} < 0,5 \text{ MN/m}^2$) de manera que el proceso de rotura de los fragmentos sea moderado. En cualquier caso, no es recomendable utilizar escolleras de rocas cuya resistencia a la compresión sea claramente inferior a los 50 MN/m^2 .

La construcción de las banquettas de enrase se hará, en general, sobre un suelo que puede haber sido previamente dragado. Ese contacto será irregular y puede requerir un mayor consumo de material de banquetta que el estrictamente teórico. Se recomienda, en ese sentido, que el espesor de banquetta teórico del proyecto sea, al menos, de un metro, de manera que se cubran todas las irregularidades.

En general, existirá un flujo de agua en el entorno de ese contacto y eso puede conducir a un proceso de erosión que socave la banquetta. Por ese motivo es recomendable que la base de la banquetta tenga una granulometría más cerrada; que haga de filtro frente al fondo natural.

La nivelación de la cara superior de las banquettas de enrase debe ser cuidadosa, de manera que el apoyo de los bloques o de los cajones sea lo más plano y homogéneo posible; de otra forma se producirían asientos diferenciales y esfuerzos parásitos mayores en la estructura del muelle.

En la parte superior de la banquetta en la franja de apoyo del muelle, se limitará el tamaño máximo de la escollera (del orden de 50 kg) de manera que se pueda preparar después una superficie plana con gravas para el enrase final.

Deben esmerarse las operaciones de limpieza de la base de apoyo. Es posible que, entre el final de construcción de la banquetta y la colocación de los bloques o el cajón, se produzca un proceso de sedimentación que deje una capa de fangos en la cara superior de la banquetta. En ese sentido, la colocación de la estructura y el enrase de la banquetta deben realizarse con el menor desfase posible. La inspección de la cimentación y su limpieza, si fuera necesario, deben realizarse inmediatamente antes de la colocación de la estructura sobre la banquetta.

Consideración de los movimientos

En el proyecto de muelles de gravedad sobre suelos, se tendrán en cuenta los movimientos que puedan producirse como consecuencia de la deformación del cimientó.

Esto puede llevar a construir los muelles con cotas teóricas de cimentación más altas, para compensar los posibles asentamientos, e incluso con cierta inclinación teórica, para compensar futuros desplomes debidos al giro del cimientó. De otra forma las correcciones posteriores, que siempre pueden ser realizadas al construir la superestructura, pueden resultar demasiado grandes.

Los movimientos del muelle deben vigilarse durante su construcción, de manera que a la hora de construirse la superestructura se disponga de un pronóstico fiable de los movimientos remanentes y, de esa forma, se pueda actuar en consecuencia.

Consideración sobre las juntas

Las juntas entre los cajones y entre los bloques serán pasos preferentes del agua en las carreras de marea y durante los oleajes.

La separación entre los cajones debe ser suficientemente amplia para absorber las irregularidades de construcción pero después han de protegerse, con algún procedimiento de eficacia probada, para evitar posibles arrastres causados por el flujo de agua.

Las juntas entre bloques son difícilmente controlables y, por lo tanto, en zonas donde pudiera haber oleaje, se producirán subpresiones importantes (la presión del agua en las juntas tarda en disiparse y puede ser mayor que la del agua en el frente cuando la ola baja) que pueden desestabilizar los bloques. La construcción de muelles de bloques en zonas de oleaje es, por este motivo, problemática.

La construcción de la superestructura debe proyectarse de manera que se permita el juego correspondiente a los movimientos remanentes debidos a la construcción del muelle, así como los debidos a las futuras cargas y sobrecargas. En ese sentido deben disponerse las juntas convenientes.

Secuencia constructiva

En general las peores condiciones frente a los Estados Límite Últimos se darán con la obra terminada y en ciertas situaciones de las sobrecargas. Es posible, sin embargo, que en ciertas Fases de Construcción se produzca, transitoriamente, una situación adversa.

Esa circunstancia puede darse, por ejemplo, cuando se inicia el trasdosado del muelle antes de completar su estructura.

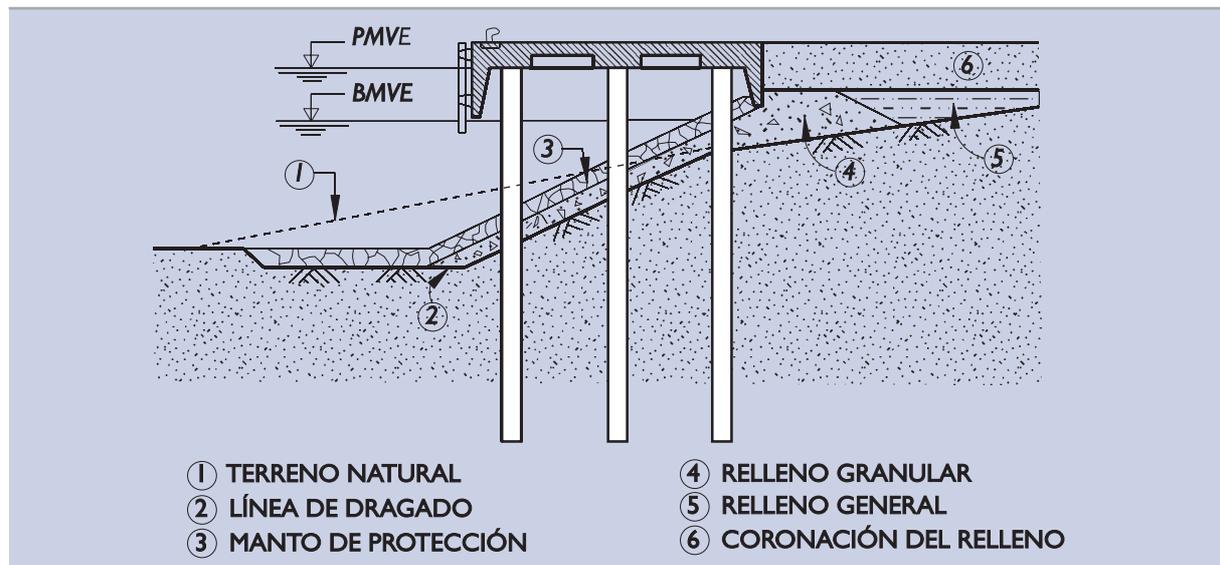
Por ese motivo, las comprobaciones de seguridad indicadas en los apartados precedentes deben extenderse a todas las fases de la secuencia constructiva del muelle.

4.3 MUELLES Y PANTALANES DE PILOTES

La construcción de muelles apoyados sobre cimentaciones profundas es una práctica obligada en aquellos terrenos en los que el sustrato resistente está a una profundidad excesiva para construir muelles de gravedad. Pueden ser también de interés en terrenos de compacidad media, como alternativa a otras tipologías posibles.

El esquema típico del muelle de pilotes se representa en la Fig. 4.3.1, donde se indican los elementos geotécnicos más característicos.

Figura 4.3.1. Muelle de pilotes



Aunque en el esquema indicado se representa la plataforma del muelle sustentada únicamente mediante pilotes verticales, existen otras disposiciones donde se incluyen algunos pilotes inclinados de manera que colaboren, con su resistencia axial, a soportar los esfuerzos horizontales.

Los pantalanes de pilotes tienen, en general, una estructura más simple. Los rellenos de talud y trasdós, que complican a los muelles con terraplén adosado, no existen. Las recomendaciones que aquí se hacen para los muelles, sin embargo, deben seguirse, en aquello que resulte de aplicación, en el proyecto de los pantalanes.

4.3.1 El terreno natural. Estudio del cimiento

El estudio del terreno en el entorno de la obra debe realizarse con el objeto de poder evaluar la seguridad frente a los estados límite que aquí se citan y con el fin de estudiar con antelación los posibles problemas de ejecución, en especial la hinca de los pilotes, en caso de que tal tipo de solución sea de interés.

A esos efectos, será necesario conocer la estratigrafía del terreno hasta un nivel claramente situado bajo las puntas de los pilotes más profundos que después puedan proyectarse.

De cada nivel o terreno diferente, será necesario conocer su naturaleza y granulometría (ensayos de identificación), su densidad natural, su humedad y su resistencia al corte. En general, también será necesario conocer la deformabilidad del terreno, bien mediante ensayos de campo específicos (presiómetros, por ejemplo) o bien mediante ensayos de laboratorio.

Entre los reconocimientos geotécnicos de más interés para el estudio de la capacidad portante de los pilotes, deben citarse los ensayos de penetración estática continuos en suelos blandos y los ensayos SPT en suelos granulares.

En el reconocimiento de formaciones rocosas, donde pudieran empotrarse o apoyarse, en profundidad, las puntas de los pilotes, será necesario conocer, además de su naturaleza y estado de densidad y humedad, su grado de diaclasamiento y alteración y la resistencia a compresión simple de su matriz.

Es importante, además, estudiar bien la zona de transición suelo-roca. En ella podrían quedar las puntas de los pilotes, si así lo especificara el proyecto.

En la planificación de los reconocimientos geotécnicos se tendrá en cuenta, además, el entorno de la obra, ya que será necesario, en general, analizar los problemas asociados a la estabilidad global del muelle, así como aspectos relacionados con el deslizamiento local del talud del muelle entre los pilotes que sustentan la plataforma.

Para planificar y realizar los reconocimientos del terreno se tendrán en cuenta las recomendaciones que se indican en la Parte 2 de esta ROM. También deberá tenerse presente que la información buscada con estos reconocimientos ha de utilizarse posteriormente siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.6 “Cimentaciones profundas” y, por lo tanto, es obligado el conocimiento y la consideración de las mismas.

4.3.2 Elección del tipo de pilote

Los pilotes que pueden utilizarse en la construcción de muelles y pantalanes son de tipos muy variados. Desde el punto de vista geotécnico conviene distinguir dos grandes grupos:

a. Pilotes hormigonados “in situ”

Su ejecución requiere la perforación previa del terreno y la ejecución posterior del hormigón. Dependiendo del procedimiento de ejecución, existe una gran variedad de tipos que no se intenta describir aquí.

b. Pilotes prefabricados hincados

El elemento estructural del pilote se hinca en el terreno mediante percusión (en ocasiones mediante vibración) en su cabeza.

Dependiendo del tipo de material (hormigón armado o pretensado, acero, madera, etc.) y dependiendo de la técnica de hincado, existen también un buen número de tipologías de pilotes hincados.

Existen, además, algunos pilotes que podrían clasificarse en un lugar intermedio entre estos dos tipos básicos, tal como se describe en el apartado 3.6.1.2 de esta ROM.

No existen criterios geotécnicos generales que indiquen la conveniencia de un tipo específico de pilote para construir muelles o pantalanes y por eso el ingeniero debe considerar, en cada caso concreto, varios tipos de pilotes y elegir, tras un estudio comparativo, el más adecuado.

Al realizar ese estudio comparativo, se tendrán en cuenta los siguientes factores:

◆ Posibilidades de ejecución

Prácticamente cualquier tipo de pilote puede ser construido en cualquier tipo de terreno. Las dificultades que pueden ofrecer ciertos niveles duros que hayan de atravesarse, o el empotramiento en roca, se pueden resolver mejor con pilotes hormigonados “in situ” aunque también puede realizarse con pilotes hincados (ayudas de lanzas de agua, por ejemplo),

La utilización de pilotes hormigonados “in situ” en la construcción de muelles puede exigir o un encaisado especial de la zona superior (parte exenta más los primeros metros del terreno natural) o la construcción de rellenos provisionales. Ambas alternativas han de estudiarse y compararse.

Los grandes pilotes prefabricados de hormigón son difíciles de hincar con inclinaciones fuertes. Los esfuerzos horizontales, en esos casos, han de soportarse por flexión, aprovechando la capacidad estructural del pilote.

Los pilotes de gran capacidad de carga individual son en general más indicados en los muelles de gran calado.

◆ **Aprovechamiento de la capacidad resistente**

La capacidad estructural de los pilotes debe estar en consonancia con la resistencia del terreno. Utilizar los pilotes de gran capacidad de carga estructural en terrenos que proporcionan una carga de hundimiento baja implicaría un sobredimensionamiento estructural. Esto puede ser necesario cuando se soportan esfuerzos horizontales fuertes con pilotes verticales que necesitan gran resistencia a flexión.

En general, cuando la mayor parte de la resistencia del terreno se moviliza por fuste, son más indicados los pilotes de menor tamaño. En los pilotes columna, que transmiten la carga principalmente por punta, los pilotes de gran tamaño pueden conducir a un mejor aprovechamiento de su capacidad de carga estructural.

◆ **Comportamiento a largo plazo**

En la elección de los materiales que constituyen los pilotes debe considerarse la durabilidad en las condiciones de servicio. Los hormigones de baja calidad, las maderas no tratadas y los elementos metálicos no protegidos, pueden conducir a problemas de pérdida de capacidad, particularmente en las zonas de carrera de marea.

La elección del tipo de pilote, particularmente la determinación de su tamaño, repercute notablemente en el proyecto de la superestructura del muelle. El estudio comparativo de las distintas alternativas de pilotes debe incluir la consideración del tipo de superestructura asociado.

La comparación, durante la realización del proyecto, de costes y plazos de construcción de diversas alternativas que tengan un nivel de seguridad común debe conducir a la selección del tipo de pilote más adecuado.

4.3.3 Estudio de los materiales

Los materiales de relleno a utilizar en los muelles de pilotes pueden ser de tipo y función muy variado. En general existirá:

- ◆ Un material de protección contra la socavación en el pie delantero del muelle.
- ◆ Un manto de protección del talud.
- ◆ Un relleno general.

Los dos primeros materiales, también en términos generales, estarán formados por escolleras, aunque pueden también estar formados por bloques, losas u otros elementos, generalmente de hormigón.

En caso de escolleras, interesa conocer la naturaleza de la roca, su densidad, su alterabilidad, su resistencia a compresión simple y con esas propiedades podrá evaluarse su durabilidad (existen también ensayos específicos de durabilidad que pueden realizarse en casos dudosos). La granulometría del material es un dato esencial para evaluar su resistencia a la erosión.

Bajo el manto de protección del talud, puede ser necesario disponer capas de transición que cumplan la condición de filtro hasta el terreno natural o relleno general. De estos materiales interesa conocer las características granulométricas, así como la durabilidad de los minerales que forman sus granos.

De los otros materiales de relleno que puedan intervenir en un determinado proyecto interesarán, en general, sus características de identificación (granulometría y límites de Atterberg) y sus posibles condiciones de estado (densidad seca y humedad). En ocasiones, su resistencia y/o su deformabilidad puede ser trascendente y, en esos casos, serán necesarios ensayos adicionales.

Para los rellenos a colocar por encima del nivel del agua, mediante extendido y compactación, será necesario conocer, además de los datos indicados en el párrafo anterior, las características de compactación en laboratorio (ensayos Proctor y CBR, por ejemplo), así como otros ensayos específicos para poder calificar la explanada que se pueda conseguir con ellos, según se indica en la ROM 4.1 "Pavimentos portuarios".

Los fondos naturales donde se construyen muelles de pilotes suelen estar formados por suelos poco resistentes. El peso de los rellenos provocará un asiento que será importante a la hora de utilizar la explanada superior. El estudio de la consolidación de los fondos naturales (ensayos edométricos, reconocimiento geotécnico con piezoconos, etc.) será de gran importancia en estos casos.

4.3.4 Acciones sobre los pilotes

A efectos de comprobar los estados límite que más adelante se indican, es necesario el cálculo previo de las acciones en las cabezas de los pilotes o puntos de unión pilote-superestructura.

Las cargas sobre los muelles pueden tener un marcado carácter impulsivo (ataque y amarre). En los muelles y especialmente en los pantalanes puede ser necesario considerar el efecto del oleaje.

Los valores de cálculo de las acciones han de determinarse después de considerar el fenómeno de interacción del agente con el conjunto de la estructura del muelle y el terreno. Esto puede requerir un cálculo dinámico de interacción cuyas bases se exponen en el apartado 3.10.

Para calcular esas acciones, cada pilote se puede representar en el modelo de cálculo correspondiente mediante una viga de características similares a las del pilote real en la parte exenta. La parte enterrada se puede representar como una viga rígida sustentada en un extremo inferior mediante unos resortes cuyas constantes dependen de las características del terreno y del propio pilote. En la Fig. 3.6.15 de la Parte 3 de esta ROM se indican unas fórmulas aproximadas para estimar la longitud de esta viga rígida y para calcular las constantes de los resortes que la sustentan.

Las acciones del oleaje sobre los pilotes pueden evaluarse con las fórmulas de Morison, que son de amplio uso y que no se incluyen aquí por ser principalmente un problema hidráulico y de solución bien conocida.

El carácter cíclico y alternante o impulsivo de las acciones ha de tenerse en cuenta en el cálculo. En el apartado 4.3.5.3 se indican algunas recomendaciones en este sentido.

Las combinaciones de carga a tener en cuenta en el estudio de los estados límite que aquí se consideran son las indicadas en esta ROM 0.5 (apartado 3.3.5.4).

El empuje del terreno sobre la parte trasera del muelle estará en consonancia con el movimiento esperado del muelle. En general se admite, para el cálculo de los Estados Límite Últimos que aquí se consideran, que el empuje sea calculado en la condición de activo cuando el movimiento del muelle, en la hipótesis correspondiente, sea en el sentido de alejarse de las tierras que producen el empuje.

Cuando el movimiento del muelle sea en sentido contrario, el empuje de tierras a considerar estará comprendido entre el empuje al reposo y el empuje pasivo, dependiendo del movimiento relativo entre el mue-

lle y las tierras. A efectos de evaluar esta situación se deben seguir las recomendaciones indicadas en el apartado 3.7.

En las disposiciones estructurales con pilotes inclinados, puede resultar que algún pilote, en alguna situación de proyecto, resulte traccionado. Puede ser conveniente, en esos casos, disponer unas plataformas estructurales más pesadas que limiten estas tracciones.

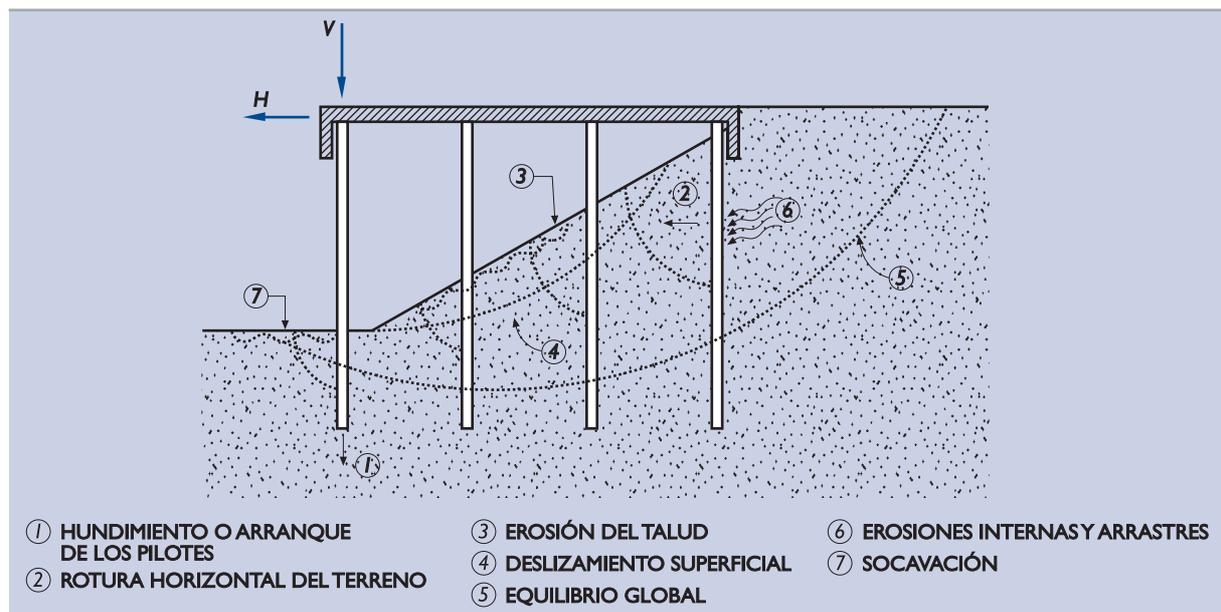
A efectos de analizar otros estados límite controlados por la resistencia estructural del pilote pueden ser necesarios otros cálculos, sobre los que se dan recomendaciones en el apartado 3.6 de esta ROM.

4.3.5 Estados Límite Últimos

Los Estados Límite Últimos que deben contemplarse en el proyecto de muelles y pantalanés sobre pilotes y que están controlados por la resistencia del terreno, son los que se consideran en los apartados que siguen. Los modos de fallo correspondientes se indican esquemáticamente en la Fig. 4.3.2.

Además de estos modos de fallo, de tipo geotécnico, deben considerarse otros modos controlados principalmente por la resistencia estructural de los pilotes o de la superestructura del muelle y que no son objeto de esta ROM.

Figura 4.3.2. Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes



4.3.5.1 Verificación de la seguridad frente al hundimiento o arranque de los pilotes

La carga que actúa individualmente en la cabeza de cada pilote (o sección de unión con la superestructura) debe determinarse, para cada combinación de acciones estipuladas, siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 4.3.4 precedente.

La componente axial de la carga individual de cada pilote permitirá calcular el coeficiente de seguridad frente al hundimiento (o arranque, si la acción fuese de tracción) según el procedimiento que se indica en el apartado 3.6 de esta ROM, y verificar que los coeficientes de seguridad obtenidos son superiores a los mínimos indicados en la Tabla 3.6.1, según el caso.

El posible efecto del rozamiento negativo se tendrá en cuenta siguiendo las recomendaciones indicadas en 3.6.3.4.1.

El efecto grupo debe considerarse tal como se indica en los apartados 3.6.6 y 3.6.7.

4.3.5.2 Verificación de la seguridad frente a la rotura horizontal del terreno

Las cargas horizontales en muelles y pantalanes pueden ser muy importantes debido a los empujes de atraque, a los tiros de amarre y, en ocasiones, a los efectos del viento sobre la superestructura, del oleaje y del empuje de tierras.

Las acciones del viento y del oleaje sobre el muelle serán determinadas según se especifica en las correspondientes ROM y atendiendo a los criterios generales que se indican en 3.3.5.

Los empujes de tierras sobre el talón trasero del muelle se calcularán, a efectos de la comprobación de este Estado Límite Último, suponiendo la condición de empuje activo y se considerarán como una acción externa.

En aquellos casos especiales en los que el mecanismo de rotura horizontal del terreno objeto de comprobación implique un movimiento del muelle hacia las tierras, el coeficiente de empuje utilizado para evaluar el empuje de tierras en la parte trasera del muelle será el empuje pasivo. El empuje pasivo será considerado como una resistencia a sumar a la de los pilotes y no como una acción externa. Para realizar estas comprobaciones se supondrá que el pilote está enterrado desde su intersección con el talud del relleno y que sólo actúa sobre él, como acción, la que le transmita la estructura y el oleaje que pueda afectarle directamente. Los empujes del terreno que suelen actuar en los pilotes en talud, calculados como se indica en el apartado 3.6.3.4.3, no se tendrán en cuenta en esta situación de empuje de la estructura del muelle contra tierra.

Cuando se produzca la situación contraria, de tiro sobre el muelle y movimiento de éste hacia el lado mar, o cuando el movimiento del muelle no sea significativo, los pilotes se considerarán enterrados a cierta profundidad, h , bajo la línea de intersección del talud del muelle con el eje del pilote y sobre esa zona de altura h se supondrá como acción permanente el empuje del talud del muelle sobre el pilote. El cálculo de h y del empuje correspondiente se realizará tal como se indica en el apartado 3.6.3.4.3.

El coeficiente de seguridad frente a rotura horizontal del terreno se define como cociente entre la suma de las resistencias de cada pilote (y eventualmente el empuje pasivo del trasdós del muelle, si es el caso) y la acción horizontal total, esto es:

$$F_{(\text{rotura horizontal})} = \frac{\sum_{i=1}^n H_{(\text{rotura})}}{H}$$

donde:

$H_{(\text{rotura})}$ = resistencia individual a la rotura horizontal del terreno de cada uno de los “ n ” pilotes de cada cuchillo del muelle. El empuje pasivo se contabilizará como una resistencia más, cuando la rotura que se estudia es hacia el lado tierra.

H = fuerza total actuante sobre el ancho de muelle correspondiente al cuchillo. Si la rotura que se analiza es hacia el lado mar, el empuje activo de las tierras sobre el muro de cierre del muelle se contabilizará como una acción más.

La carga de rotura horizontal individual en cada pilote se evaluará siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado 3.6.8, donde además se indican recomendaciones para considerar el efecto grupo y los coeficientes de seguridad mínimos que deben obtenerse.

4.3.5.3 Verificación de la seguridad frente a la erosión del talud

El agua del mar, en el entorno de los muelles y pantalanes de pilotes, puede moverse de manera significativa y será el ingeniero quien determine un valor razonable de los parámetros y factores que intervengan en este problema.

Son causa de movimiento el oleaje, las posibles corrientes y los propios buques, especialmente cuando van dotados de potentes hélices transversales.

El movimiento del agua en el entorno del muelle puede provocar la erosión superficial del talud. Por ese motivo, los taludes de los muelles de pilotes deben tener mantos protectores de escollera u otros elementos análogos.

La estabilidad del manto protector de los taludes puede analizarse mediante fórmulas empírico-experimentales del tipo de la inicialmente propuesta por Iribarren. A estos efectos, podría utilizarse la fórmula de Hudson:

$$W = \frac{\gamma_s H_d^3}{K_D \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right)^3 \cotg \alpha}$$

donde:

- W = peso nominal de los bloques de protección.
- H_d = altura de la ola de proyecto.
- γ_s = peso específico unitario de los elementos de protección.
- γ_w = peso específico del agua.
- α = ángulo de inclinación del talud respecto a la horizontal.
- K_D = coeficiente de estabilidad de los elementos de protección.

El ingeniero debe conocer la altura de la ola de proyecto que puede afectar a la obra. A falta de otra información más específica se tomará, para una situación portuaria usual (muelles abrigados), una altura de ola de proyecto como mínimo igual a un metro (H_d ≥ 1 m), que podría representar el oleaje causado por el paso de un buque. Cuando sea previsible el atraque de buques con hélices transversales, esa altura de cálculo debe ser como mínimo igual a 2 m (H_d ≥ 2 m).

El coeficiente de estabilidad de los bloques de escollera rugosa y angulosa que normalmente se utiliza se supondrá:

- K_D = 4 para la zona frontal del muelle.
- K_D = 2,3 para las zonas extremas, donde la erosión superficial puede ser más acusada.

Si se utilizan elementos artificiales de protección el ingeniero utilizará los coeficientes de estabilidad adecuados.

El espesor de la capa de protección será al correspondiente a dos capas del material adoptado, no siendo menor de 1 a 1,5 m.

El ingeniero puede utilizar otros procedimientos de proyecto de la capa de protección, aportando siempre la debida justificación.

4.3.5.4 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento superficial del talud

El deslizamiento del talud del muelle, según líneas de rotura que no penetren en su interior a profundidades mayores que la mitad de la separación entre cuchillos (aproximadamente), debe considerarse como rotura super-

ficial. La estabilidad según esas líneas de rotura no estaría condicionada por la presencia de los pilotes; el talud podría deslizarse entre dos cuchillos de pilotes sin que éstos colaboren en la resistencia al deslizamiento.

El estudio de la estabilidad al deslizamiento del talud según estas líneas de deslizamiento superficiales debe realizarse siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado 3.8. En el apartado 4.7.3.2 se indican recomendaciones complementarias que pueden ser de interés.

Profundidades de deslizamiento mayores implicarían la intervención de los pilotes del talud. El problema entonces es diferente y debe calificarse como un Estado Límite Último de estabilidad global de la obra. La rotura conjunta del talud y de los pilotes se considera a continuación.

4.3.5.5 Verificación de la seguridad frente al equilibrio global

La rotura del terreno, englobando total o parcialmente al muelle, es una situación límite controlada, principalmente, por la resistencia del terreno.

Los deslizamientos superficiales del talud, según líneas de rotura poco profundas comparadas con la separación entre cuchillos de pilotes (espesores de la masa deslizante máximos inferiores a la mitad de esa separación, como orden de magnitud), deben considerarse como deslizamientos superficiales y no como un problema de estabilidad global, ya que de ocurrir no implicarían necesariamente la rotura simultánea de los pilotes del muelle. El análisis del Estado Límite Último producido por deslizamientos superficiales se ha comentado en el apartado anterior.

La seguridad frente al Estado Límite Último de equilibrio global debe comprobarse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.8 de esta ROM y los niveles de seguridad alcanzados deben superar los mínimos que allí se indican.

La presencia de los pilotes en el talud hace que el cálculo del coeficiente de seguridad correspondiente, siguiendo las recomendaciones generales que se indican en el apartado 3.8.4, sea complicado. Por ese motivo se considera aceptable el método simplificado de cálculo que se ilustra en la Fig. 4.3.3.

Según ese procedimiento el conjunto del terreno y los pilotes puede representarse por un terreno equivalente sin pilotes pero con un aumento virtual de su cohesión.

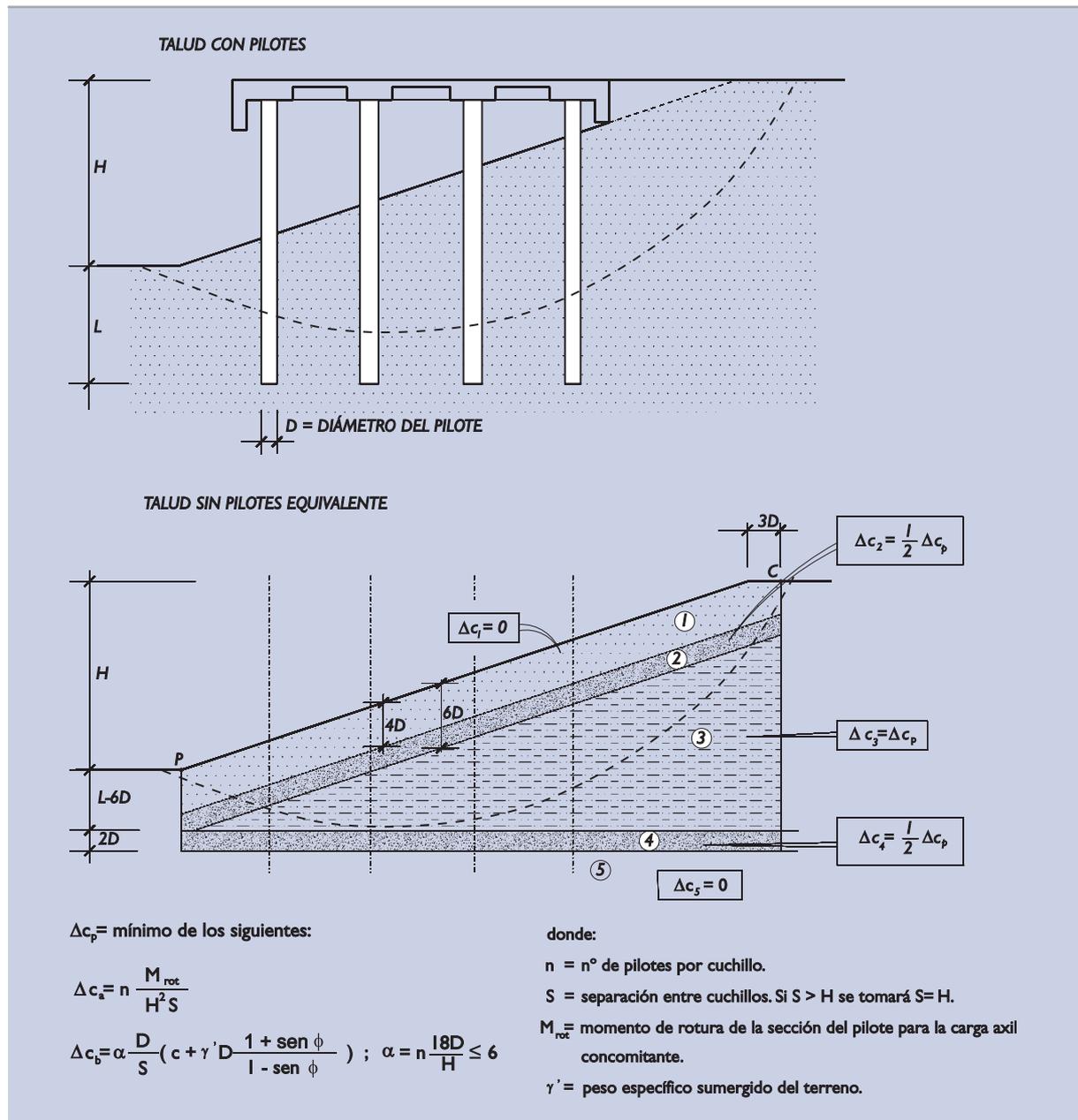
El aumento virtual de la cohesión que ha de suponerse para representar la presencia de los pilotes es diferente para cada una de las cinco zonas que se indican en la citada figura.

- Zona 1.** Queda delimitada por la vertical que pasa por el pie P y por la vertical que pasa por la cabeza C y tiene un espesor medido en vertical igual a $4D$.
- Zona 2.** Está limitada por las dos mismas verticales, queda debajo de la anterior y tiene un espesor medido en vertical $2D$.
- Zona 3.** Queda comprendida entre las zonas 2 y 4.
- Zona 4.** Banda horizontal de espesor $2D$ con su cara superior ubicada a una profundidad $L-6D$ bajo el pie, P.
- Zona 5.** El resto del semiespacio.

En la zona 3 es donde ha de suponerse un aumento de cohesión igual al valor Δc_p que se indica en la Fig. 4.3.3. En las zonas 2 y 4, adyacentes, el valor del incremento de cohesión que debe suponerse es la mitad del anterior. En las zonas 1 y 5 se supondrá que no hay incremento de cohesión.

El aumento de cohesión, Δc_p , correspondiente a la zona 3 está calculado, en ese procedimiento simplificado, por una doble vía. Por un lado se considera la máxima carga que puede soportar la estructura de cada pilote, que se caracteriza por el momento flector de rotura (M_{rot}) concomitante con la carga axial correspondiente a la hipótesis de cálculo en estudio. Por otro lado se considera la máxima carga que el terreno de la masa deslizante es capaz de transmitir a cada pilote antes de fluir alrededor de él. El valor menor de los dos incrementos de cohesión es el que debe utilizarse en los cálculos.

Figura 4.3.3. Método simplificado de cálculo de estabilidad



En el cálculo del incremento de cohesión virtual producido por este segundo efecto (Δc_b en la figura que se comenta), es necesario utilizar como dato la resistencia del material del talud. Éste estará formado, en general, por materiales de distinta resistencia y por lo tanto será necesario hacer un promedio adecuado. Siempre será conservador suponer que el terreno es homogéneo y utilizar la resistencia del terreno más débil.

Cuando el estudio del equilibrio global sea crítico, será preciso realizar cálculos más precisos.

En particular, se quiere advertir sobre la peligrosidad de deslizamientos profundos que interesen estratos débiles de poco espesor. Ese tipo de rotura, cuyo riesgo no es valorable con cálculos mediante líneas de rotura circulares, debe ser analizado siguiendo el método general indicado en 3.8.4.6, suponiendo líneas de rotura cuyo fondo tenga un gran desarrollo en el estrato débil.

4.3.5.6 Verificación de la seguridad frente a las erosiones internas y arrastres

El movimiento del agua puede provocar el arrastre de partículas del suelo y producir una erosión interna.

Las erosiones internas deben evitarse analizando el movimiento del agua y disponiendo los materiales con granulometría tal que en cada contacto se cumpla la condición de filtro. Se tendrá en cuenta, además, que los materiales externos, en contacto directo con el agua, sean autoestables ante las filtraciones. A este respecto, se dan recomendaciones más detalladas en el apartado 3.4.7 de esta ROM.

4.3.5.7 Verificación de la seguridad frente a las socavaciones

La socavación del pie del talud de un muelle de pilotes puede provocar un Estado Límite Último de degradación progresiva, cuya ocurrencia puede acarrear la ruina de la obra.

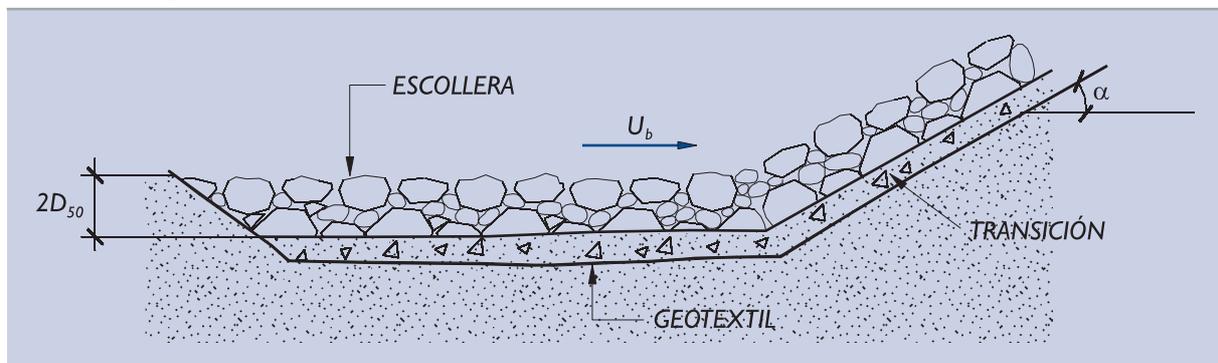
La socavación puede ser provocada por las hélices de los barcos, por las corrientes de agua y por el oleaje, así como por otras causas artificiales menos previsibles.

El ingeniero debe considerar este modo de fallo y tomar, al respecto, las medidas preventivas adecuadas.

Una posible forma de protección es la que se indica en la Fig. 4.3.4. Su dimensionamiento está basado en la estimación de la velocidad del agua U_b que previamente habrá que determinar.

En el apartado 4.2.3.7 se indican algunas recomendaciones relativas a la socavación en el entorno del pie de los muelles de gravedad que son aplicables también a este caso.

Figura 4.3.4. Método de cálculo de la protección de pie del talud mediante escolleros de características granulométricas no uniformes



TAMAÑO DE ESCOLLERA

$$D_{50} \geq h \cdot \left[\frac{U_b}{B \sqrt{K \cdot \Psi \cdot g \cdot (G-1) \cdot h}} \right]^{2,5}$$

D_{50} = tamaño medio de la escollera de protección.

B = número adimensional que depende del tipo de flujo:

$B = 6$ (flujo turbulento).

$B = 7$ a 8 (flujo normal).

$B = 8$ a 10 (flujo poco turbulento).

K = coeficiente reductor por efecto de la inclinación del talud, $K = 1 - \sin^2 \alpha / \sin^2 \phi$. Siendo α = ángulo de inclinación del talud y ϕ = ángulo de rozamiento interno del terreno de apoyo de la protección.

- ψ = parámetro adimensional que depende del comportamiento buscado:
 $\psi = 0,03$ (sin movimiento de piezas).
 $\psi = 0,04$ (inicio del movimiento de piezas).
 $\psi = 0,06$ (rotura).
- g = aceleración de la gravedad.
 G = peso específico relativo de la escollera.
 h = calado.

4.3.5.8 Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos

Los coeficientes de seguridad mínimos que el ingeniero debe adoptar en el proyecto de muelles y pantalanés de pilotes para asegurar que cada uno de los Estados Límite Últimos no se sobrepasa, están definidos en la Parte 3 de esta ROM.

Al describir, en los apartados precedentes, cada uno de los modos de fallo, se ha hecho una referencia puntual al apartado de la ROM donde se define el procedimiento de cálculo y el coeficiente de seguridad a adoptar. Ambos aspectos (método de cálculo y coeficiente de seguridad) están ligados y no deben dissociarse. A pesar de ello, se adjunta a continuación la Tabla 4.3.1, donde se resumen los coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a cada modo de fallo. El ingeniero debe conocer el método de análisis asociado antes de utilizarlos.

Tabla 4.3.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles y pantalanés pilotados. ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.6.6	Hundimiento del pilote	1,4 a 2,6	1,3 a 2,3	1,3 a 2
3.6.7	Arranque del pilote	1,4 a 2,6	1,3 a 2,3	1,3 a 2
3.6.8	Rotura del terreno por empujes horizontales	1,8	1,6	1,5
–	Erosión en talud	MP	–	–
3.8	Deslizamiento superficial del talud	1,4	1,3	1,1
3.8	Equilibrio total	1,4	1,3	1,1
–	Erosiones internas y arrastres	MP	–	–
–	Socavaciones	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.3 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de aumento y reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

Nota 3: Para hundimiento y arranque el coeficiente de seguridad depende del método de análisis. Ver Tabla 3.6.1.

4.3.6 Estados Límite de Servicio

El movimiento de la superestructura del muelle, el asiento del relleno o los movimientos diferenciales entre ambos, pueden ser incompatibles con la correcta utilización del muelle.

La estimación del movimiento de los tableros de los muelles y de los pantalanés puede hacerse con el mismo modelo estructural que se utilice para el cálculo de esfuerzos en los pilotes, que debe incluir la consideración debida del efecto de interacción suelo-estructura mediante resortes equivalentes o mediante otros modelos más complejos.

Las acciones de empuje de tierras en la parte trasera del muelle, a utilizar en los cálculos de movimientos, deben ser compatibles con el movimiento relativo tierras-muelle.

El empuje de tierras sobre la parte enterrada de los pilotes a considerar en el cálculo de movimientos puede ser nulo, siempre que el coeficiente de seguridad frente al equilibrio global sea superior a 1,7. De otra forma, habrán de suponerse empujes de tierra adicionales sobre los pilotes tal como se indica en 3.6.3.4.3.

En aquellos casos en que el coeficiente de seguridad frente al Estado Límite Último de equilibrio global sea menor que el indicado y siempre que el movimiento del muelle resulte ser un aspecto crítico del proyecto, se recomienda realizar cálculos más precisos y además disponer en el proyecto algún procedimiento de observación que permita después, al realizar la obra, la confirmación de los resultados.

El cálculo preciso de los movimientos de los muelles de pilotes requerirá, en general, una consideración del proceso constructivo.

4.3.7 Otras recomendaciones

En otra parte del Programa ROM se dan recomendaciones específicas para el proyecto de este tipo de estructuras; aquí quieren añadirse algunas recomendaciones de tipo general ligadas a ciertos aspectos geotécnicos de los muelles y pantalanés apoyados sobre pilotes.

Pruebas de carga

El reconocimiento del terreno y los cálculos teóricos de comprobación de los Estados Límite Últimos permiten proyectar debidamente este tipo de obras. Las pruebas de carga, sin embargo, pueden proporcionar una confirmación mucho más precisa de algunos aspectos de gran interés.

Las pruebas de carga vertical de hundimiento de pilotes iguales que los de proyecto (o similares, reduciendo algo su tamaño para facilitar las pruebas) son de gran interés, ya que permiten una estimación más precisa de la capacidad portante de los pilotes, y ello puede incluso redundar en una ventaja económica (particularmente cuando se trata de construir gran cantidad de pilotes). Los coeficientes de seguridad mínimos requeridos, cuando la estimación de cargas de hundimiento está avalada por pruebas de carga, son menores que en los otros casos, tal como se indica en el apartado 3.6.6 (Tabla 3.6.1).

Las pruebas de tiro horizontal en pilotes individuales o entre pilotes son, en general, de menor dificultad y su ejecución es siempre conveniente para estimar mejor los módulos de reacción horizontal del terreno que se describen en 3.6.9.2.

Si los pilotes de estas pruebas de tiro no han de ser utilizados como parte permanente de la estructura, se puede aumentar la carga horizontal y prolongar el ensayo hasta la rotura y así mejorar la evaluación posterior del Estado Límite Último correspondiente.

Control individual de pilotes

La importancia de cada pilote en un muelle apoyado sobre elementos individuales de gran capacidad portante es tal que un defecto estructural en alguna parte de uno de ellos puede tener consecuencias importantes. Por ese motivo se recomienda que en la Fase de proyecto se especifique el control individualizado de cada pilote.

En los pilotes hormigonados “in situ” se deben emplear, aparte de las técnicas usuales de control de calidad, ensayos de integridad estructural posterior a su ejecución.

En los pilotes hincados, y a efectos de ese control individual, puede ser adecuada la auscultación dinámica de la hincada mediante acelerómetros y defómetros, que permitan el registro de la onda de choque y sus réplicas.

Secuencia constructiva

Un mismo muelle puede realizarse con varias secuencias constructivas. La adopción de la más conveniente debe ser realizada a la hora de proyecto.

La ejecución de los pilotes antes o después de la construcción parcial de los rellenos es un tema de interés a la hora de evaluar posibles esfuerzos parásitos en los pilotes.

La forma de construir los mantos de protección del talud del muelle influye notablemente en esos esfuerzos. Una colocación del manto de manera cuidadosa (colocación con grúa y mediante tongadas horizontales, por ejemplo) es siempre conveniente para no dañar los pilotes.

Control de movimientos y esfuerzos

Los esfuerzos que pueden inducirse en los pilotes, a causa de operaciones constructivas posteriores a su instalación, son difíciles de precisar. Por ese motivo resulta recomendable no sólo controlar el movimiento de los pilotes y de la superestructura del muelle, sino también instrumentar algunos pilotes con varios extensómetros en cada sección y en varias secciones a diferentes alturas, de manera que se tenga conocimiento de los esfuerzos a medida que se van generando.

4.4 MUELLES DE PANTALLAS

4.4.1 Tipología básica

La tipología básica del muelle de pantallas se indica de manera esquemática en la Fig. 4.4.1, donde se destacan los elementos geotécnicos de más interés.

La construcción de muelles de este tipo requiere la ejecución de las pantallas y su atirantado, así como las tareas de dragado y relleno necesarias para crear la geometría conveniente.

Con frecuencia, las pantallas están formadas por tablestacas metálicas aunque este elemento estructural puede estar formado también por una pared plana de hormigón moldeado «in situ» u otros procedimientos. A efectos de las comprobaciones que se comentan a continuación, ambos tipos de pared son similares.

Las pantallas de hormigón pueden construirse prácticamente en cualquier terreno. Ofrecen la ventaja de la posibilidad de empotramiento en terreno firme o roca (excavaciones con trépano o con hidrofresa), que es más difícil de conseguir con tablestacas metálicas hincadas.

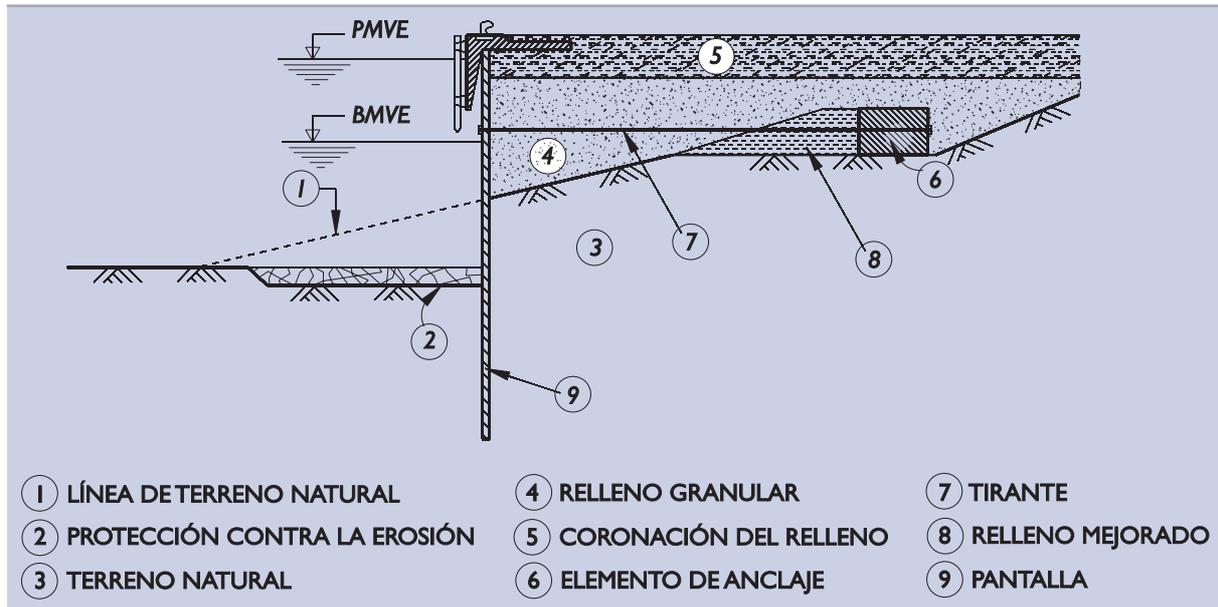
El sistema de anclaje suele consistir en barras o cables de acero, unidos debidamente a la pantalla y a una estructura trasera de anclaje que puede consistir en otra pantalla más corta o en un «muerto» de hormigón, como se indica en la figura, o en una placa vertical u horizontal enterrada. El muerto o la placa pueden estar simplemente apoyados en el terreno o cimentados sobre pilotes, que proporcionan mayor capacidad de reacción y permite acortar la longitud del anclaje.

Son posibles, también, como sistemas de anclaje, los cables o barras de acero o micropilotes, alojados en perforaciones y unidos al terreno mediante rellenos inyectados de morteros o lechadas de cemento.

Son posibles, en fin, gran variedad de disposiciones estructurales similares que, a efectos de las comprobaciones a realizar, según se recomienda en los apartados que siguen, pueden considerarse equivalentes.

Los recintos cerrados de tablestacas o ataguías celulares y los muelles formados por dos pantallas paralelas y próximas, sin embargo, han de considerarse diferentes y por eso se tratan en otro apartado (ver apartado 4.5).

Figura 4.4.1. Muelle de pantallas



El proyecto y la construcción de los muelles de pantallas requiere la consideración de numerosos factores. En esta ROM se indicarán Recomendaciones generales sobre las comprobaciones de tipo geotécnico intentando separar las de otro tipo que serán objeto, en un futuro próximo, de otros documentos del Programa ROM.

4.4.2 Datos del terreno

El terreno donde se haya de construir un muelle de pantallas es un aspecto condicionante. El comportamiento correcto del muelle necesita una cierta capacidad de soporte tanto en sentido vertical como en horizontal.

En sentido vertical, el terreno habrá de soportar el peso del muelle, las cargas y sobrecargas. Los terrenos flojos pueden dar lugar a asentamientos importantes y a problemas de estabilidad.

En sentido horizontal, las pantallas requieren la colaboración del terreno en su zona de empotramiento. Los terrenos flojos pueden conducir a pantallas muy largas y a esfuerzos muy elevados en su estructura.

Los fondos rocosos, por otro lado, pueden dificultar la hincada de tablestacas o incluso impedir la y condicionar este tipo de solución. Sería necesario, entonces, proyectar pantallas excavadas «in situ».

El terreno del entorno del muelle debe ser conocido con detalle antes de proceder a las comprobaciones de proyecto que aquí se recomiendan. En particular, es de especial importancia conocer la capacidad de soporte horizontal del terreno y ese dato se puede obtener mediante ensayos triaxiales realizados con muestras inalteradas. Los ensayos «in situ» mediante penetrómetros estáticos o mediante presiómetros son especialmente indicados.

De cada nivel del terreno conviene determinar, además de sus características de identificación (granulometría y límites de Atterberg) sus características de estado natural (densidad y humedad), así como su resistencia al corte y su deformabilidad.

En caso de rocas donde pudieran apoyarse o empotrarse las pantallas, conviene conocer su naturaleza, su densidad y su humedad, así como una descripción precisa de su grado de alteración y de su diaclasamiento.

Como quiera que las comprobaciones a realizar implican la intervención del terreno en un entorno amplio (estabilidad global, influencia de las capas profundas en los asentamientos, etc), los reconocimientos deben extenderse

en planta y en profundidad de manera que se tenga un conocimiento adecuado de todo el entorno. En la Parte 2 de esta ROM se dan, a estos efectos, recomendaciones de detalle.

4.4.3 Estudio de materiales

En general y al igual que en los muelles de gravedad o pilotados, será necesario proteger el pie de las pantallas contra los fenómenos de erosión o socavación y eso requerirá rellenos de escollera cuyo origen y calidad será necesario investigar a la hora del proyecto. En ese sentido son aquí aplicables los comentarios realizados en 4.2.2.

El trasdosado de las pantallas debe realizarse preferentemente con materiales granulares, que empujan menos y son menos susceptibles de movimientos diferidos. De esos materiales de trasdós conviene conocer su densidad y humedad, tal como se esperan en la obra, así como su resistencia al corte, que puede investigarse mediante ensayos de laboratorio.

En la coronación, por encima del nivel del agua, pueden utilizarse materiales distintos colocados mediante extendido y compactación. La clasificación geotécnica de estos materiales, la relación entre la humedad de colocación y la densidad alcanzada en ensayos de compactación, así como la determinación de su capacidad portante (CBR) son datos de interés para el control de su ejecución cara al proyecto de futuros pavimentos.

4.4.4 Comportamiento estructural

Los elementos estructurales de este tipo de muelle son:

- ◆ Pantalla.
- ◆ Tirante.
- ◆ Viga de unión de pantallas.
- ◆ Sistema de unión tirante-pantalla.
- ◆ Sistema de anclaje al terreno.
- ◆ Superestructura y sus defensas.

El dimensionamiento de la pantalla como elemento estructural requiere una serie de consideraciones que aquí no se comentan en su integridad. Únicamente se darán algunas recomendaciones sobre la estimación de esfuerzos.

Los anclajes, cuyo proyecto detallado también exige un buen número de consideraciones, sólo se considerarán aquí desde un punto de vista global.

Los detalles de las uniones anclaje-pantalla o anclaje macizo de reacción, la superestructura y sus defensas, así como otros muchos aspectos del proyecto del muelle se consideran fuera del alcance de esta ROM y serán objeto de la futura actividad de este Programa.

4.4.4.1 Tensión en el tirante

Los tirantes que normalmente se utilizan en muelles de tablestacas son de tipo pasivo o ligeramente pretensados. La carga que soportan, en ese caso, es la que se produce como reacción a las acciones sobre la pantalla. En cualquier caso, siempre se pueden colocar con cierta tensión y existe posibilidad de medir y regular su carga.

En ocasiones los anclajes son activos, dándose en cierto momento una carga preestablecida que después puede variar en función de las deformaciones posteriores del muelle. En ese caso el control de la tensión del anclaje es mayor.

Las fuerzas de anclaje son una de las incógnitas principales en los muelles de tablestacas; su determinación precisa sólo es posible mediante la medición a posteriori, auscultando la obra. La determinación aproximada de la fuerza de anclaje es, sin embargo, posible mediante procedimientos simplificados descritos en la literatura técnica.

El procedimiento de estimación de la carga en el anclaje que se indica en el apartado 3.7.11.1.4 es un método sencillo recomendable para aquellos casos en los que se esperan deformaciones apreciables.

La construcción de anclajes activos, la colocación de rellenos tras la colocación del anclaje, la utilización de pantallas muy rígidas (de hormigón armado, por ejemplo) pueden conducir a situaciones en las que el empuje de las tierras sea mayor que el activo, particularmente en la zona alta de la pantalla. Por ese motivo se recomienda, o bien adoptar coeficientes de seguridad altos (a definir en una futura ROM) cuando se utilice ese procedimiento de cálculo simplificado, o bien hacer la consideración debida del efecto de interacción suelo-estructura.

4.4.4.2 Esfuerzos en la pantalla

Los esfuerzos que actúan en la pantalla se pueden obtener una vez conocidas las presiones en el contacto terreno-pantalla.

Las presiones de contacto se suelen dividir en dos componentes, una debida al agua intersticial y otra debida al esqueleto del suelo. La primera se puede evaluar, al menos en una primera aproximación, mediante los métodos usuales de la mecánica del suelo. La segunda componente es de más difícil precisión ya que depende de las deformaciones del suelo.

La presión del agua sobre las pantallas puede determinarse mediante la construcción previa de la red de filtración. Sobre el dibujo de las redes de filtración estacionaria se dan recomendaciones en el apartado 3.4 de esta ROM.

La colocación de sobrecargas o las propias operaciones de construcción pueden provocar excesos transitorios de presión intersticial, que deben considerarse a la hora de calcular algunas situaciones singulares de empuje.

El empuje efectivo de las tierras contra la pantalla podría suponerse, en principio, igual al que corresponde a las situaciones límites de empuje activo o pasivo, según corresponda.

Los esfuerzos en la pantalla calculados con los empujes correspondientes a los Estados Límite Últimos pueden ser muy diferentes de los que realmente ocurren en la pantalla en condiciones de servicio. Esto es especialmente importante en las pantallas rígidas o en aquellos casos en los que el anclaje permite poca deformación. También ocurre en aquellos casos en los que se disponen anclajes activos y, en general, en todas aquellas ocasiones en que las deformaciones del terreno estén más coartadas. En muchas ocasiones, la redistribución de empujes es tal que el momento flector máximo debido a los empujes efectivos de las tierras (la flexión debida a los empujes de agua no sufren esta redistribución) es hasta un 30% inferior al calculado con ese procedimiento simplificado.

El ingeniero debe analizar el caso concreto de su proyecto y evaluar los esfuerzos en la pantalla con una precisión acorde con la importancia de la obra. En términos generales se considera recomendable, para todos los proyectos, realizar un cálculo de interacción pantalla-terreno simulando las fases constructivas de la obra.

El procedimiento simplificado de cálculo que se indica en el apartado 3.7.11.2.2 permite obtener una visión aproximada del comportamiento de la pantalla.

4.4.5 Estados Límite Últimos

Para comprobar la seguridad de un muelle de pantallas conviene imaginar una serie de situaciones límite sencillas que representan distintos modos de fallo. La obra, en general, estará lejos de esas situaciones teóricas que sólo podrían ocurrir en caso de existir un defecto grave.

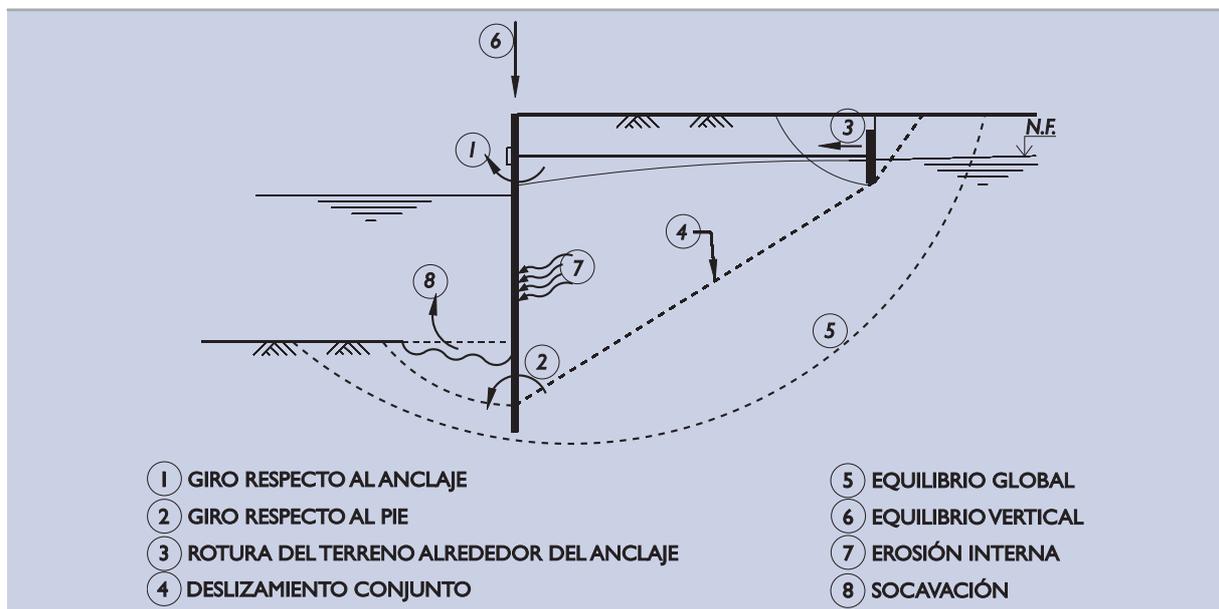
Para definir la ubicación de nivel de agua en trasdós e intradós se tendrá en cuenta lo dicho en 4.2.3 (muelles de gravedad). A estos efectos, si no se realizan disposiciones especiales de drenaje, los muelles de tablestacas deben suponerse impermeables.

En los apartados que siguen se dan algunas recomendaciones sobre los modos teóricos de fallo más usuales, indicando el procedimiento de análisis y la forma de introducir la seguridad para separar el comportamiento real de esos modos de rotura no deseados.

Se consideran, únicamente, aquellos modos de fallo controlados por la resistencia del terreno. La rotura del anclaje o de la pantalla o de sus uniones se considera fuera del ámbito de esta ROM.

Los modos de fallo considerados se indican de manera esquemática en la Fig. 4.4.2.

Figura 4.4.2. Modos de fallo geotécnicos en muelles de pantallas



Nota: Existen otros modos de rotura que implican el agotamiento estructural de la pantalla, de sus anclajes, de sus uniones, etc., que no se consideran aquí ya que son de tipo estructural.

A efectos de las comprobaciones de seguridad que más adelante se indican, el cálculo de los empujes del terreno se realizará de acuerdo con las recomendaciones que, a este respecto, se indican en el apartado 3.7.

El ingeniero podrá justificar, en su caso particular, la adopción de otros criterios de cálculo de empujes.

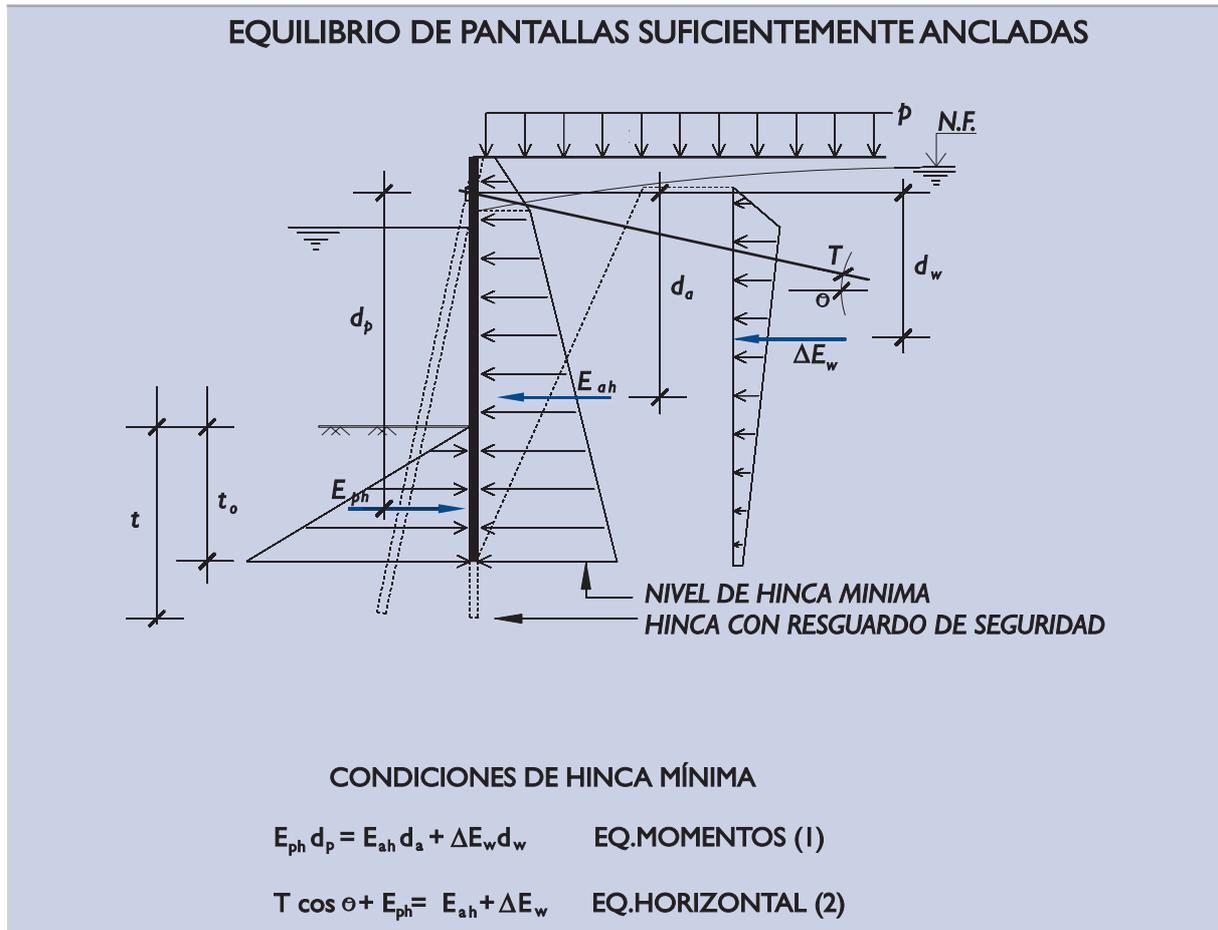
4.4.5.1 Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del anclaje

En este modo teórico de fallo la pantalla gira alrededor de un punto alto situado en o por encima del nivel de anclaje, tal como se indica, esquemáticamente, en la Fig. 4.4.3.

Ese modo de fallo es posible siempre que la capacidad de anclaje sea suficientemente alta como para evitar su rotura.

La pantalla estará enterrada, bajo la línea de dragado, una longitud t , siempre mayor que la longitud mínima necesaria para evitar este modo de fallo, denominada t_0 en la mencionada figura.

Figura 4.4.3. Giro alrededor del anclaje



Interesa, para definir la seguridad frente al giro alrededor del anclaje, conocer esa profundidad de hincamiento mínima necesaria y para ello es preciso, previamente, calcular las leyes de empujes activos horizontales en el trasdós de la pantalla (lado tierra) y la ley de empujes pasivos horizontales en el intradós (lado mar).

Para dibujar esas leyes deben seguirse las recomendaciones del apartado 3.7 dedicado al estudio de empujes sobre estructuras de contención.

Para el cálculo de los empujes será conservador suponer que las pantallas son impermeables. Así se debe proceder salvo que en proyecto se hagan disposiciones constructivas especiales que permitan el paso parcial del agua.

Una vez definidas las leyes de empuje, es relativamente fácil obtener la profundidad de hincamiento mínima que se busca tomando momentos respecto al punto de anclaje de todas las fuerzas que actúan sobre la pantalla. Esto se irá haciendo para varias profundidades crecientes de “ t_o ” hasta que la condición de momento nulo alrededor del anclaje (ecuación 1 en la Fig. 4.4.3) sea alcanzada.

La profundidad “ t_o ” así encontrada permite definir un coeficiente de seguridad frente a la profundidad de hincamiento, comparando la hincamiento real “ t ” con esa hincamiento mínima.

$$F = \frac{t}{t_o}$$

El coeficiente así obtenido deber ser para obras de ISA bajo, en todo caso:

$F_1 \geq 1,3$	Combinación cuasi-permanente.
$F_2 \geq 1,2$	Combinaciones características o fundamentales.
$F_3 \geq 1,1$	Combinaciones accidentales y sísmicas.

Atendiendo al carácter de la obra (valor de ISA) y a la duración de la situación de proyecto, podrán realizarse las modificaciones indicadas en 3.3.8 y 3.3.10 a los efectos de aumento o reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

Si en otras ocasiones está justificado que el ingeniero pueda pensar en otra definición del coeficiente de seguridad, en este caso particular del vuelco de las tablestacas esa consideración es especialmente importante, ya que existen procedimientos distintos de evaluar la seguridad que pueden ser igualmente aceptables. En los cálculos de proyecto, a pesar de ello, no debe omitirse la evaluación del coeficiente de seguridad que se define en este apartado aunque por razones justificadas se utilice otro umbral de seguridad mínima.

Este cálculo, además, permite obtener una carga, T, en el anclaje al imponer, para la profundidad mínima de hinca “ t_0 ” antes determinada, la condición de equilibrio horizontal (ecuación 2 de la Fig. 4.4.3).

El valor de T, así obtenido, es una primera aproximación de la capacidad mínima necesaria de anclaje. De este valor también se habla en el apartado 3.7.1.1.3, donde se indica un método más preciso para evaluar T.

En caso de existir dos o más niveles de anclajes próximos, se puede estudiar el giro respecto a un punto intermedio situado a una distancia entre ellos ponderada respecto a sus respectivas capacidades de carga (altura de paso de la resultante de las resistencias máximas de los anclajes). En ese punto se supondrá situado un anclaje virtual equivalente.

Para pantallas poco empotradas y sujetas a varios niveles este mecanismo de rotura no es indicado. El ingeniero debe investigar otros posibles mecanismos más verosímiles y adecuados a su caso particular y a su proceso constructivo.

Los esfuerzos que aparecen en la pantalla, en este mecanismo de fallo, pueden ser muy elevados, mucho mayores que los de la pantalla en servicio. Es posible que antes de ocurrir este tipo de rotura la pantalla haya agotado su capacidad estructural.

4.4.5.2 Verificación de la seguridad frente al giro alrededor del pie

La pantalla puede, al menos teóricamente, girar alrededor de un punto próximo al pie tal como se indica esquemáticamente en la Fig. 4.4.4.

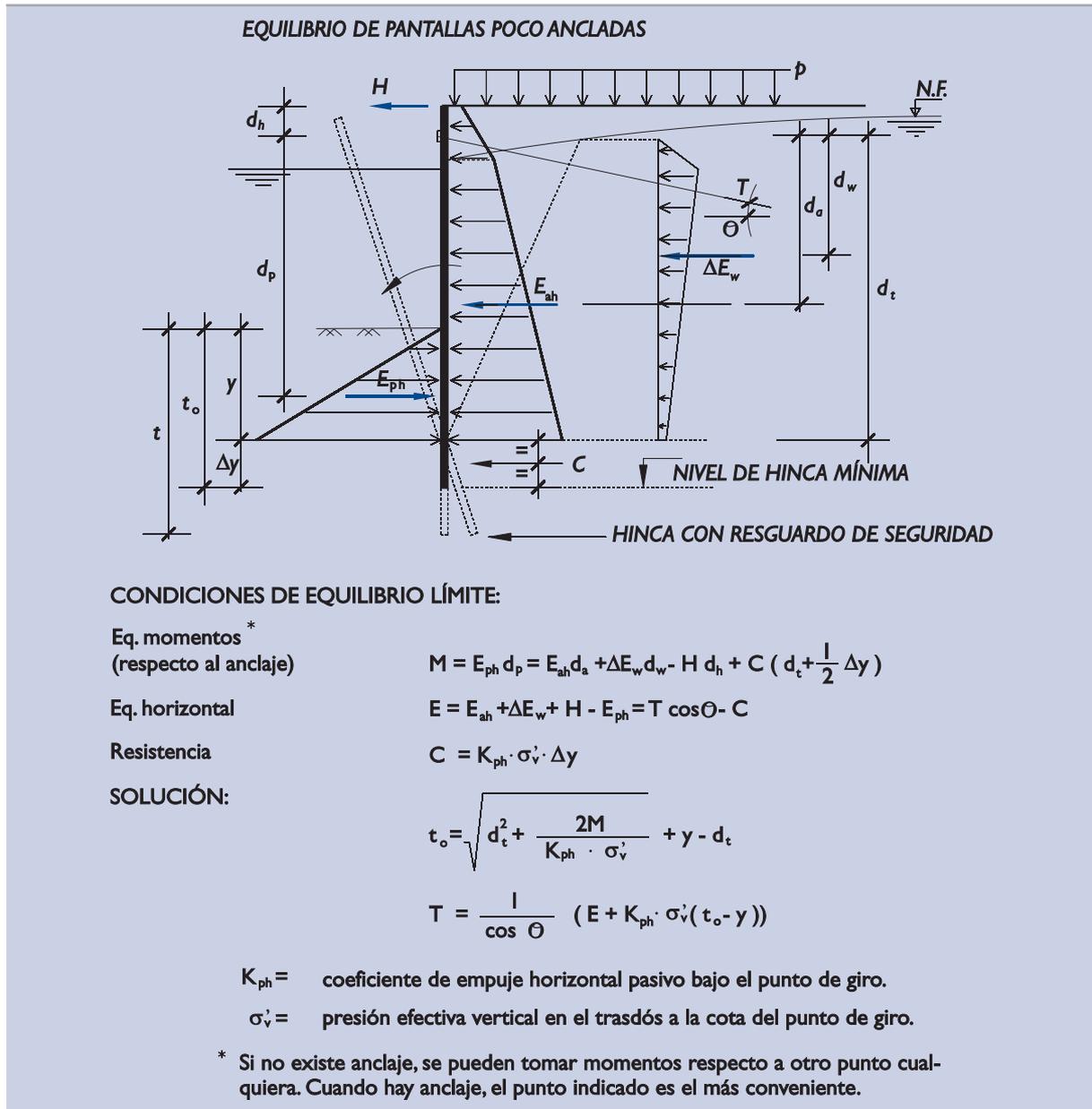
Para que esto pueda ocurrir el anclaje ha de tener una capacidad de carga muy baja, comparada con los empujes sobre la pantalla, o bien no existir (pantallas en voladizo).

A continuación se describe una forma de analizar este modo de fallo. Este procedimiento, igual que los otros que se vienen considerando en esta ROM 0.5, implica que la estructura tiene la capacidad estructural suficiente para soportar los esfuerzos necesarios para que se rompa el terreno.

Para tener cierta perspectiva de la seguridad frente al giro de la pantalla alrededor de un punto próximo a su pie, se deben analizar una serie de situaciones hipotéticas, siempre distintas de las reales. Precisamente la comparación entre ambas permitirá evaluar la seguridad.

Esas situaciones teóricas se pueden preparar, en este caso, suponiendo distintos puntos de giro, próximos al pie de la pantalla.

Figura 4.4.4. Giro alrededor del pie



Supuesto un punto de giro (profundidad «y» en la Fig. 4.4.4) es posible resolver el problema tal como se indica en esa misma figura.

Variando la situación del punto de giro se obtiene una colección de valores de la longitud de empotramiento, t_o , y de la fuerza en el anclaje, T, que indicarían que la pantalla estaría en equilibrio estricto respecto a este modo de fallo.

El cálculo de sucesivos puntos de giro debe comenzarse a partir de la profundidad mínima de empotramiento obtenida en el apartado anterior; de otra forma resultarían contraempujes C negativos.

Los resultados del análisis de esas situaciones teóricas deben representarse gráficamente, tal como se indica en la Fig. 4.4.5.

En ese diagrama de seguridad, podría situarse un punto P (tal como el A, el B, etc.) que representase la situación real de la obra, con la profundidad de empotramiento de las pantallas que realmente se espere y con la capacidad de anclaje ⁽¹⁾ que realmente se decida disponer.

El diagrama de seguridad se debe completar con la recta vertical ($t = \text{constante}$) que corresponde al modo de fallo analizado en el apartado anterior.

Según este procedimiento de análisis, se define como coeficiente de seguridad, frente a este modo de fallo, el cociente:

$$F = \frac{\overline{OP}}{\overline{OP'}}$$

donde \overline{OP} y $\overline{OP'}$ son las distancias al origen de los puntos P y P' en el diagrama de seguridad. P representa los datos reales de la pantalla. P' se obtiene como intersección de la línea OP con el límite que separa la zona estable de la inestable.

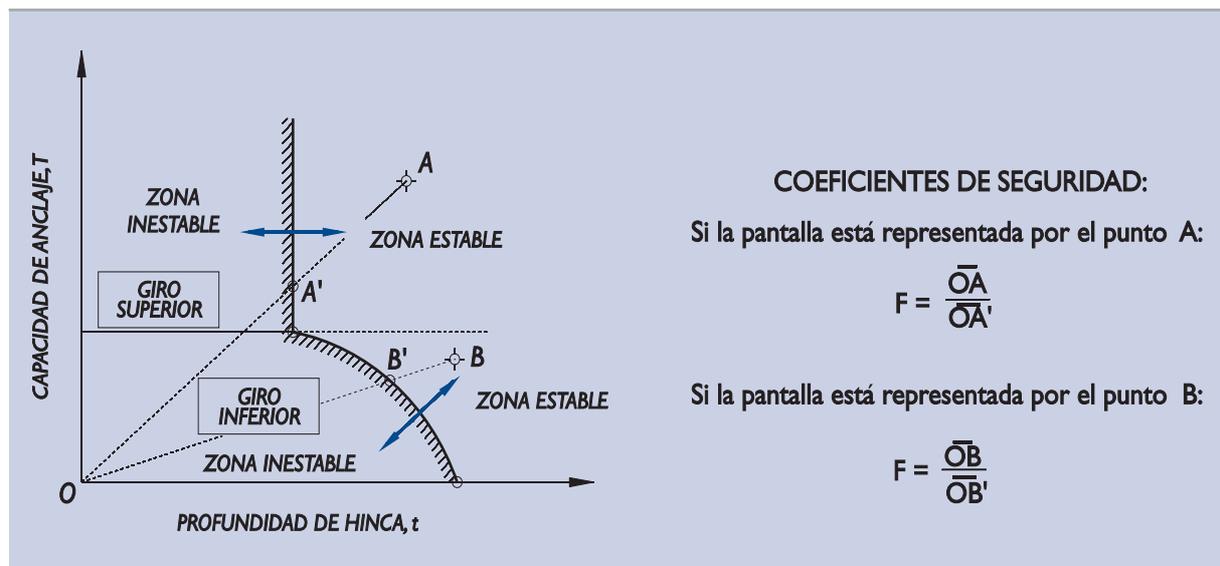
En la Fig. 4.4.5 se ilustra el procedimiento, considerando dos pantallas diferentes que estarían representadas en el diagrama de seguridad por los puntos A y B.

Una situación como la "A" indicaría como más probable la rotura según el modo de giro superior (así ocurriría al disminuir simultánea y proporcionalmente la longitud de empotramiento y la capacidad de anclaje). En una situación como la "B" el fallo ocurriría según el modo indicado en este apartado.

Los coeficientes de seguridad mínimos exigibles con este procedimiento de cálculo son los mismos indicados en el apartado anterior.

El comentario relativo a otros modos posibles de definir la seguridad, hecho en el apartado anterior, es, en este caso, igualmente aplicable.

Figura 4.4.5. Definición de la seguridad frente al giro



(1) La definición de la "capacidad de anclaje" exige contemplar ciertas consideraciones estructurales que escapan al alcance de estas Recomendaciones. Provisionalmente y, sin perjuicio de que, en el futuro, el Programa ROM pueda adoptar otro criterio, se define como capacidad de anclaje, exclusivamente a estos efectos, la mitad de la carga que provoca el límite de fluencia del material que lo forma.

4.4.5.3 Verificación de la seguridad frente a la rotura del terreno en el entorno del anclaje

La rotura del anclaje puede producirse por varios mecanismos dependiendo de la tipología del sistema empleado.

Los pilotes (o micropilotes) o barras o cables de acero alojados en el terreno mediante perforaciones inyectadas, utilizados como anclajes, pueden romperse por el contacto con el terreno o por agotamiento de su capacidad estructural.

Los anclajes de cables o barras de acero exentos (no adheridos al terreno) pueden romper por agotamiento del acero y por fallo de sus uniones a la pantalla o al macizo o pantalla de anclaje, aspectos estos que se consideran fuera del alcance de esta ROM.

Sobre la rotura por el contacto con el terreno de anclajes asimilables a pilotes pueden seguirse las recomendaciones para pilotes a tracción que se indican en el apartado 3.6.7.

Sobre la seguridad requerida frente a la rotura del terreno en el entorno de los macizos o placas de anclaje se dan algunas recomendaciones a continuación.

En general los macizos de anclaje (o muertos o durmientes o pantallas de anclaje) basan su capacidad resistente en la del terreno que los rodea. La calidad del terreno en el entorno del macizo de anclaje es, por lo tanto, el dato esencial a la hora de proyectar un sistema de anclaje.

Cuando la relación entre el recubrimiento de tierras “h” y la profundidad de cimentación del macizo o pantalla de anclaje, H, es pequeña ($h/H < 1/3$, aproximadamente) el empuje pasivo en la cara lado mar se puede considerar movilizado totalmente. Son los casos superior e intermedio indicados en la Fig. 4.4.6.

Cuando la profundidad del recubrimiento es grande, comparada con el espesor del durmiente (anclaje en losa indicado en la parte baja de la Fig. 4.4.6), es posible que el deslizamiento de la placa, rompiendo su contacto con el terreno en ambas caras, resulte más crítico.

La estimación de los empujes activos y pasivos, necesaria para verificar la seguridad contra el deslizamiento de este tipo de anclajes, debe hacerse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.7.

Se define como coeficiente de seguridad frente a este tipo de rotura del anclaje al cociente entre la fuerza que produce la rotura del anclaje y la fuerza sobre el anclaje, en la hipótesis de proyecto que se considere:

$$F = \frac{T_{(rotura)}}{T}$$

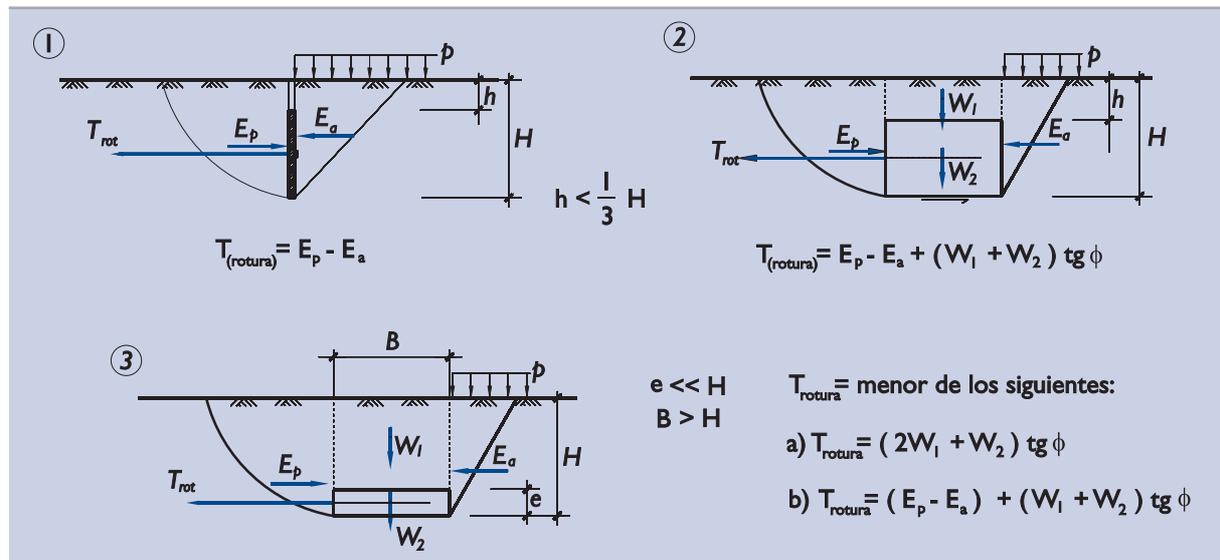
Este coeficiente de seguridad, para obras de ISA bajo (5 a 19), debe ser:

$F_1 \geq 2,5$	para combinaciones cuasi-permanentes
$F_2 \geq 2$	para combinaciones fundamentales
$F_3 \geq 1,8$	para combinaciones accidentales y sísmicas.

Además se tendrá en cuenta lo especificado en 3.3.8 y 3.3.10 a los efectos de aumento o reducción de los coeficientes de seguridad recomendados, atendiendo a otros caracteres de la obra y a la duración de la situación de proyecto.

En el apartado 3.7.9.2 se consideran otras soluciones de anclaje mediante elementos discontinuos.

Figura 4.4.6. Esquema de algunos sistemas de anclaje



Nota: En los tres casos indicados E_p y E_a corresponden a toda la altura H y su dirección es paralela al tiro "T".

4.4.5.4 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento conjunto

El deslizamiento conjunto que se considera en este apartado es similar al definido en el método de Kranz ⁽²⁾.

El mecanismo de rotura es aplicable a pantallas ancladas mediante tirantes a otras pantallas más cortas situadas a cierta distancia. Este mecanismo de fallo permite evaluar la distancia mínima a que han de disponerse esas pantallas de anclaje en función de la fuerza de anclaje necesaria.

El sólido que desliza se representa esquemáticamente en la Fig. 4.4.7. Es el terreno comprendido entre las dos pantallas dentro del bloque ABCD.

El punto B está definido en la figura como el punto de la pantalla donde el empuje del trasdós (que se supone activo) se equilibra horizontalmente con el empuje en la zona empotrada (que se supone pasivo) y con la tracción del anclaje. En ese punto el esfuerzo cortante en la pantalla sería nulo.

La situación del punto de cortante nulo es desconocida. Para realizar estos cálculos se tomará como profundidad del punto B la correspondiente a la profundidad mínima de empotramiento calculada en el apartado 4.4.5.1.

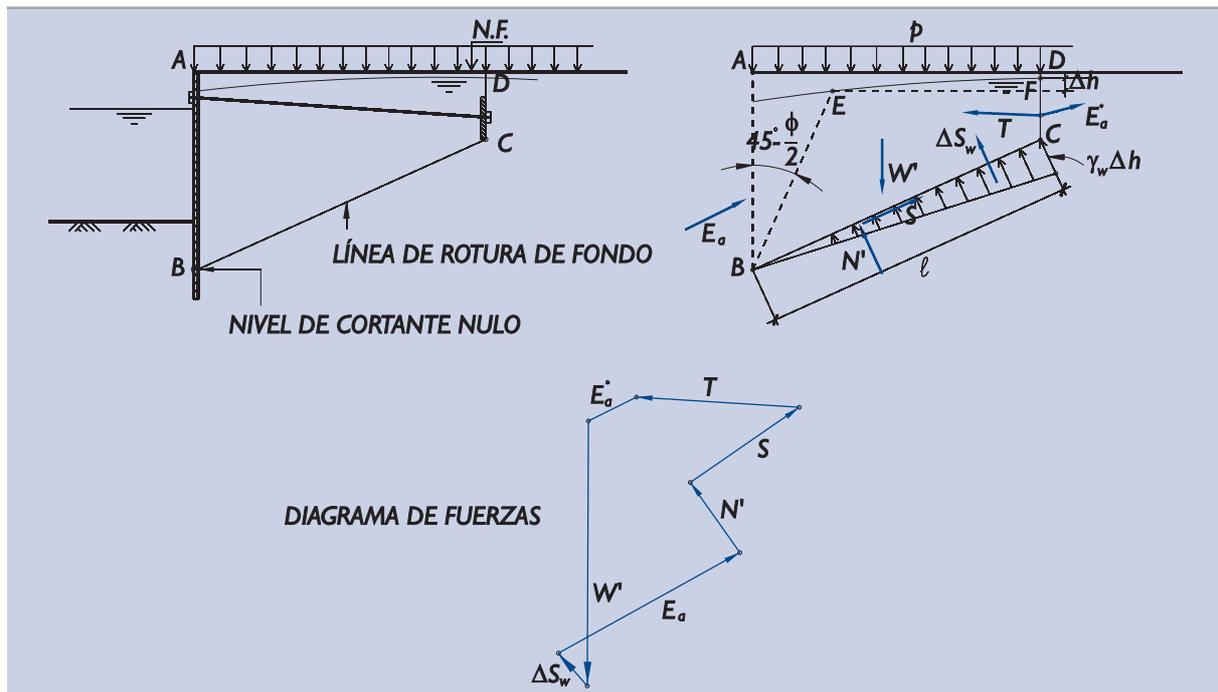
Las fuerzas que actúan sobre el bloque en estudio se calcularán como sigue:

a. Cara vertical de trasdós. Pantalla lado mar

En esta cara (AB en la figura) se supondrá actuando el empuje activo (previamente se habrá calculado para hacer otras comprobaciones). Ese empuje tendrá en general dos componentes, la debida al empuje efectivo de las tierras (incluyendo cargas y sobrecargas) y la debida al empuje del agua intersticial no

(2) "Über die Verankerung von Spunwänden". 2 Aufl. Berlin 1953.

Figura 4.4.7. Deslizamiento conjunto



compensado por el nivel del agua libre. Los cálculos de estos empujes se detallan en otra parte (apartado 3.7). El empuje E_a que se indica en la figura es la suma de esos empujes.

b. Cara vertical de la pantalla de anclaje

El terreno interior al macizo que se estudia es empujado por el tiro del anclaje y por el empuje activo de las tierras.

El tiro del anclaje es una incógnita del problema a resolver mediante el estudio de este mecanismo de rotura. De él se hablará más adelante.

El empuje activo en esta vertical (DC en la figura) se debe calcular siguiendo el procedimiento de cálculo indicado en 3.7.

c. Peso propio del bloque

El peso del bloque deslizante (ABCD, en la figura) debe calcularse añadiéndole las sobrecargas que realmente existan sobre él. Dependiendo de la inclinación de la línea de deslizamiento (BC en la figura), la presencia de cargas y sobrecargas puede ser o no ser beneficiosa. El ingeniero examinará esta cuestión en cada situación de proyecto.

El peso del bloque puede calcularse con las densidades aparentes y después descontar la subpresión en su base. En la figura que se viene comentando se insinúa un procedimiento alternativo de resultado semejante y que es más adecuado (es compatible con el método de cálculo basado en el concepto del coeficiente de empuje que se define en el apartado 3.7 de esta ROM). Por encima del nivel marcado por el punto E de la figura se utilizarían los pesos específicos aparentes y por debajo de él los pesos específicos sumergidos. Como subpresión en la línea de rotura se contabilizará únicamente la debida al exceso de presiones intersticiales sobre ese nivel. Es el valor ΔS_w indicado en la figura.

El equilibrio de estas fuerzas se indica en la parte inferior de la figura. De ese equilibrio puede deducirse la relación entre el esfuerzo de corte en el plano de deslizamiento (fuerza S) y la tensión en el anclaje T. Conocida una se puede calcular la otra.

Sería posible estimar el valor de S con la condición de rotura y obtener así un máximo posible para la fuerza de anclaje, que después se utilizaría, de alguna manera, para definir la seguridad. Aquí se recomienda realizar, además, otro cálculo semejante.

El valor mínimo de la fuerza de anclaje T, necesaria para garantizar la estabilidad de la pantalla de manera que se cumplan los requisitos mínimos de seguridad, debe suponerse igual al obtenido en el apartado 4.4.5.1 (giro alrededor del anclaje). Aunque realmente se pueda garantizar el equilibrio con menos fuerzas de anclaje, este valor de referencia es el que se debe utilizar en el cálculo que sigue.

Para ese valor de T se calculará el correspondiente de la fuerza de corte "S" que actúa en el plano de deslizamiento.

El coeficiente de seguridad frente al deslizamiento conjunto se define como el cociente:

$$F = \frac{N' \operatorname{tg} \phi + c \cdot \ell}{S}$$

donde:

- N' = reacción normal efectiva en el plano de deslizamiento.
- c, ϕ = parámetros resistentes a lo largo de la línea de deslizamiento.
- ℓ = longitud de la línea de deslizamiento.

El coeficiente de seguridad para obras de ISA bajo (5 a 19) debe ser:

- $F_1 \geq 1,5$ para combinaciones cuasi-permanentes.
- $F_2 \geq 1,3$ para combinaciones fundamentales.
- $F_3 \geq 1,1$ para combinaciones accidentales y sísmicas.

Según se indica en el apartado 3.3.8 y 3.3.10, para obras de otro carácter ($ISA < 5$ o $ISA \geq 20$), deben hacerse las adaptaciones convenientes a estos coeficientes.

De resultar este coeficiente de seguridad inferior al mínimo requerido, será necesario retrasar la situación de la pantalla de anclaje o profundizarla. La posible consideración de reducir la capacidad de anclaje no debe hacerse más que en casos especiales y deberá ser claramente justificada por el ingeniero.

Cuando el sistema de anclaje sea mediante cables o barras o micropilotes unidos rígidamente al terreno, el cálculo será similar al descrito. A esos efectos se tomará como punto C un punto situado en el propio anclaje a cierta distancia de su extremo, tal como se indica (orientativamente) en la Fig. 4.4.8. El posible efecto favorable de la parte del sistema de anclaje situada más allá (hacia el lado tierra) de la vertical de C no será considerada en los cálculos.

4.4.5.5 Verificación de la seguridad frente al equilibrio global

Es posible que otras líneas de rotura no tan próximas a los elementos estructurales y que engloben a la pantalla y a sus elementos de anclaje sean más críticas que las comentadas hasta aquí. Por ese motivo será necesario analizar el equilibrio global y, a esos efectos, se deben seguir las recomendaciones indicadas en el apartado 3.8 de esta ROM.

Se advierte expresamente sobre la posible existencia de estratos especialmente poco resistentes en profundidad y que su posible presencia debe ser investigada con precaución. En caso de conocerse una zona débil, deberán analizarse formas de rotura que tengan buena parte de la línea de deslizamiento dentro de ella. A esos efectos

A efectos de calcular la carga de hundimiento por punta de las pantallas se deberán seguir las recomendaciones indicadas en el apartado 3.6 de esta ROM.

El coeficiente de seguridad obtenido frente a este Estado Límite Último debe resultar superior a los mínimos recomendados para las cimentaciones pilotadas que se definen en el apartado 3.6.6 (Tabla 3.6.1).

4.4.5.7 Verificación de la seguridad frente a la erosión interna

El flujo del agua debido al oleaje, a las carreras de marea, o a niveles freáticos naturales o artificiales más altos en el lado tierra, puede provocar el arrastre del material del trasdós.

Es particularmente peligrosa la situación creada por algún defecto de ejecución de las pantallas o de las tablestacas que haya conducido a dejar algún hueco en su pared.

La erosión interna, si es localizada, puede conducir únicamente a “socavones” en la superficie horizontal del trasdós. Si es más extensa puede acarrear movimientos importantes del muelle o incluso su ruina.

La lucha contra la erosión interna debe realizarse evitando defectos de ejecución (la inspección del tablestacado de las pantallas tras su ejecución puede ser de interés) y disponiendo los materiales de relleno de forma que en sus contactos cumplan las condiciones de filtro (ver apartado 3.4.7 para definición de esas condiciones). También pueden disponerse filtros artificiales intercalados en el camino del agua.

4.4.5.8 Verificación de la seguridad frente a la socavación

La socavación que pueden producir las hélices de los barcos en las maniobras de atraque, el oleaje o las corrientes de mar ha de considerarse en el proyecto de los muelles de pantallas. En estos muelles la socavación es de especial importancia pues, como se ha visto, la estabilidad depende, en gran manera, del empotramiento en el lado mar. Una reducción significativa de esa profundidad, ocasionada por una socavación no prevista, puede reducir la seguridad de la obra, aumentar sus deformaciones e incluso provocar su ruina.

Sobre las medidas preventivas contra este fenómeno, son aplicables las consideraciones hechas en los apartados 4.2.3.7 y 4.3.5.7, referentes a los muelles de gravedad y de pilotes respectivamente.

4.4.5.9 Resumen de coeficientes de seguridad mínimos

Los coeficientes de seguridad que el ingeniero debe adoptar en el proyecto de muelles de pantallas, para asegurar que cada uno de los Estados Límite Últimos no se sobrepasa, están definidos en la Parte 3 de esta ROM.

Al describir, en los apartados precedentes, cada uno de los Estados Límite Últimos se ha hecho una referencia puntual al apartado de la ROM donde se define el procedimiento de cálculo y el coeficiente de seguridad a adoptar. Ambos aspectos (método de cálculo y coeficiente de seguridad) están ligados y no deben dissociarse. A pesar de ello se adjunta a continuación la Tabla 4.4.1 donde se resumen los coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a cada Estado Límite Último. El ingeniero debe conocer el método de análisis asociado antes de utilizarlos.

4.4.6 Estados Límite de Servicio

Los muelles de pantallas son, en general, muy flexibles. Su deformación puede provocar asientos o desplazamientos en estructuras próximas o incluso en la superestructura que se pueda construir sobre el propio muelle.

Las pantallas en voladizo son especialmente deformables y su utilización debe estar limitada a calados muy pequeños. Bastan desniveles de dos o tres metros para que los desplazamientos horizontales sean ya del orden de decímetros en terrenos blandos.

Tabla 4.4.1. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados para el proyecto de muelles de pantallas. Obras de ISA bajo (5 a 19)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes F_1	Fundamentales o Características F_2	Accidentales o Sísmicas F_3
3.7.11.1.3	Giro respecto al anclaje	1,3	1,2	1,1
3.7.11.1.3	Giro respecto al pie	1,3	1,2	1,1
3.7.9.2	Rotura del terreno alrededor del anclaje	3,0	2,4	2
3.8	Deslizamiento conjunto	1,5	1,3	1,2
3,8	Equilibrio global	1,4	1,3	1,1
3.7.11.1.3	Equilibrio vertical	2,5	2	1,5
–	Erosión interna	MP	–	–
–	Socavación	MP	–	–

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.4 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10, a los efectos de aumento y reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

Las deformaciones de los muelles de pantallas están controladas no sólo por la calidad del terreno sino también por el sistema de anclaje. Las deformaciones de estos elementos pueden ser elevadas, particularmente en aquellos casos en los que la resistencia está basada en la movilización de empujes pasivos.

La estimación de deformaciones puede hacerse por vía empírica, mediante analogía con otras obras similares donde se hayan medido desplazamientos, o por vía analítica, mediante cálculos adecuados de interacción suelo-estructura.

En pantallas de hormigón el estudio de la fisuración será un elemento crucial del proyecto.

Los muelles de pantallas construidos sobre suelos blandos pueden dar lugar a asientos importantes. La consolidación natural del terreno sobre el que se vierten los rellenos así como la consolidación de los propios rellenos puede ser causa de grandes asientos diferidos. Su estudio es una tarea necesaria.

El efecto de los asientos en el sistema de anclaje ha de examinarse expresamente, ya que puede provocar flexiones indebidas e incluso su rotura. Los anclajes deben estar debidamente protegidos contra esta circunstancia adversa (dentro de cajetines de suficiente altura, por ejemplo).

Los elementos importantes que se sitúen en el trasdós del muelle pueden requerir una cimentación profunda, no sólo para evitar su movimiento sino también para reducir los empujes sobre la pantalla.

4.4.7 Otras recomendaciones

Provisionalmente y aparte de otras indicaciones que puedan darse en futuros documentos del Programa ROM, se quieren avanzar aquí algunos aspectos de interés.

Drenaje

Las paredes de las tablestacas (también las pantallas de hormigón) son, en general, impermeables y por lo tanto pueden generarse en su trasdós sobrepresiones importantes de agua. El proyecto de un sistema adecuado de drenaje (con válvulas de clapeta, por ejemplo) puede ser de interés para reducir los empujes en momentos de marea baja.

La revisión periódica del funcionamiento de las clapetas sería en esos casos una práctica obligada. En cualquier caso, estas medidas de drenaje exigen que el relleno de trasdós, en la zona próxima a la pantalla, sea granular y que se disponga un sistema de filtro adecuado.

Longitudes de tablestaca

La parte enterrada de las tablestacas próxima a la punta está solicitada, estructuralmente, con esfuerzos menores que los que se producen en otros puntos (a la altura de la línea de dragado, por ejemplo). Por ese motivo se pueden proyectar hincas más cortas en algunas tablestacas. Algo similar puede decirse de la parte próxima a la cabeza.

Haciendo las consideraciones debidas podrá proyectarse un muelle suficientemente seguro con tablestacas alternas (una de cada tres o incluso una de cada dos) de menor longitud. Ese ahorro, sin embargo, puede aparejar otras complicaciones constructivas.

No es recomendable que, con ese argumento, se reduzcan las hincas en más de 1 m.

Es posible también construir pantallas más cortas apoyadas sobre pilotes, regularmente espaciados, que profundizan más en el terreno. La zona profunda de los pilotes debe ser capaz de soportar las fuerzas que corresponden a la parte de pantalla no construida.

Inclinación

En general, los muelles de pantallas se inclinan hacia el mar como consecuencia de los empujes del trasdós. El postensado de los anclajes o la hincas de las tablestacas con cierta inclinación hacia el lado tierra son asuntos cuya consideración es recomendable.

4.5 MUELLES DE RECINTOS DE TABLESTACAS

Dentro del Programa ROM, está previsto dedicar un documento donde se considere, conjuntamente, el comportamiento estructural y el comportamiento geotécnico de los muelles formados por recintos tablestacados.

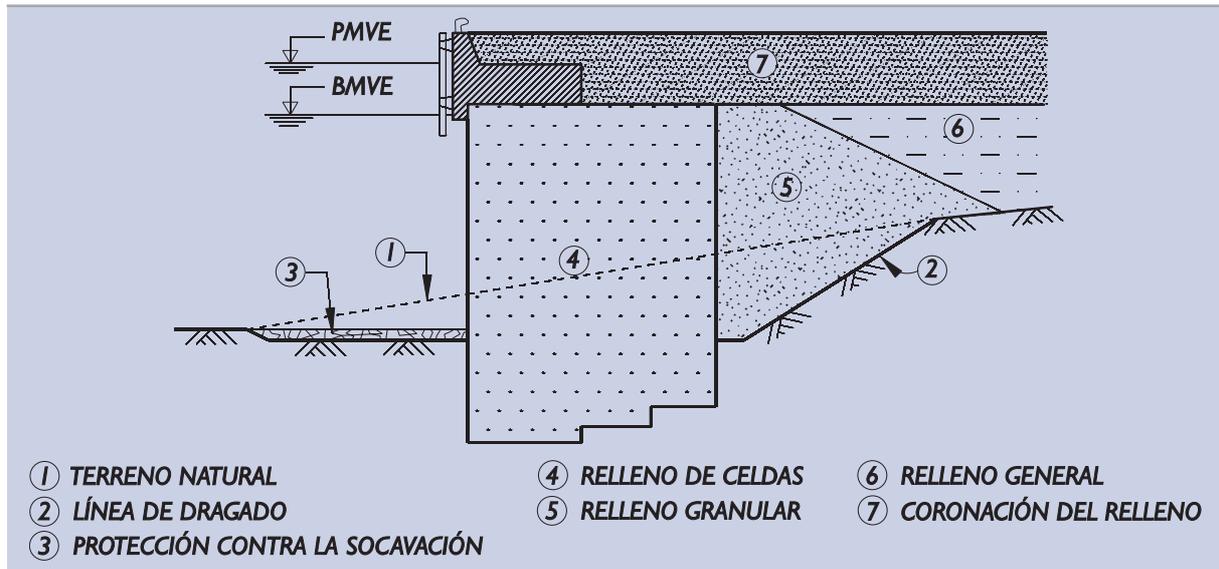
Aunque es difícil separar ambos aspectos del problema, se han avanzado en esta ROM 0.5, dedicada a la geotecnia, algunas recomendaciones provisionales que puedan guiar al ingeniero en el proyecto de estas estructuras.

Se advierte, por lo tanto, que las recomendaciones que siguen son incompletas; los aspectos principales del comportamiento estructural sólo se esbozan.

4.5.1 Tipología

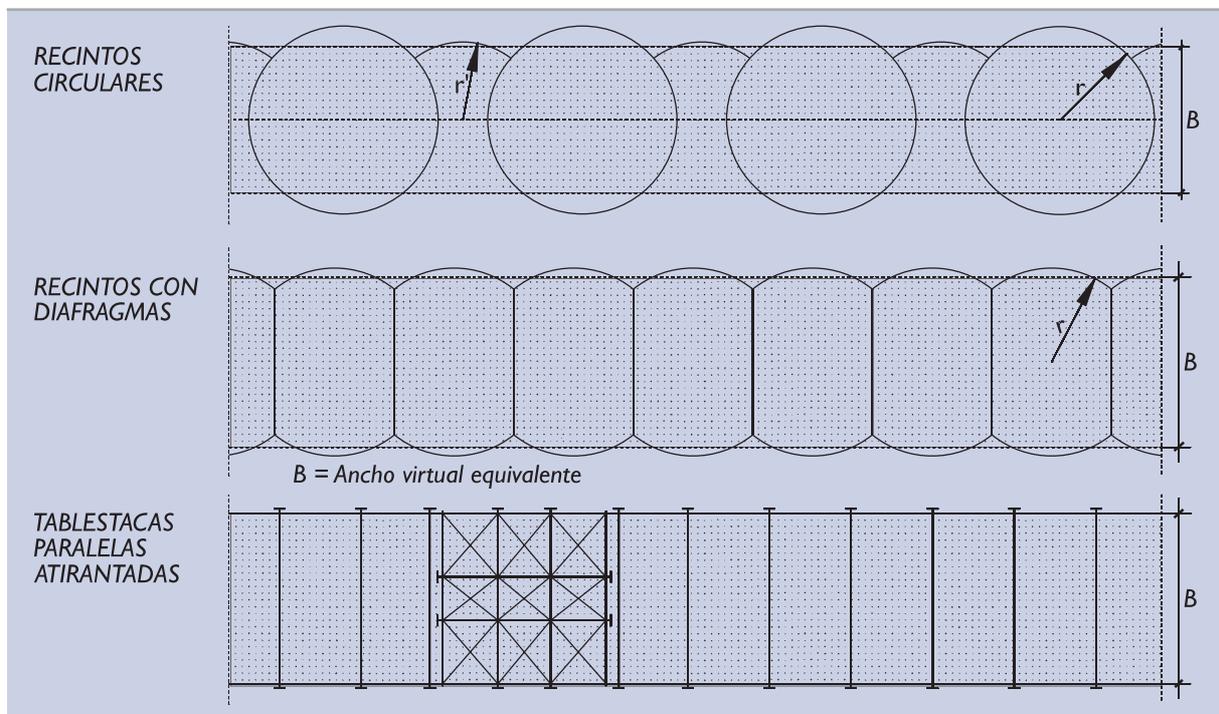
La tipología básica del muelle de recintos de tablestacas se indica esquemáticamente en la Fig. 4.5.1, donde se destacan los elementos principales desde el punto de vista geotécnico.

Figura 4.5.1. Muelle de recintos de tablestacas



Los recintos de tablestacas se pueden construir con formas circulares de tablestacas planas, creando celdas independientes que después se unen, en la parte delantera (y eventualmente en la trasera), mediante arcos de tablestacas con formas especiales. También pueden construirse mediante celdas con diafragmas, de paredes transversales rectas y frontales curvos. Ambos tipos se indican esquemáticamente en la Fig. 4.5.2.

Figura 4.5.2. Planta esquemática de recintos de tablestacas



Con los recintos circulares, se pueden hacer los rellenos de las celdas de manera independiente. Con los recintos de diafragmas, han de hacerse los rellenos de manera simultánea (es permisible cierto desfase) y han de

utilizarse un mayor número de tablestacas. Su posible ventaja estriba en menores esfuerzos en la tablestaca (para un mismo calado).

Dentro de esta categoría pueden considerarse, además, los muelles formados por dos filas de tablestacas paralelas arriostradas entre sí a distintos niveles. Esta tipología sería un caso especial del muelle de tablestacas ancladas en las que el anclaje se consigue mediante una segunda fila de tablestacas similar a la del lado mar. En este tipo de solución es frecuente proyectar algún recinto especialmente arriostrado que rigidice la estructura y facilite el relleno diferencial a uno y otro lado.

Los recintos de diafragmas pueden tener los tabiques curvos, facilitando así el relleno diferencial entre celdas adyacentes.

Existen, además, variantes adecuadas para grandes calados, tales como las de forma de trébol de cuatro hojas atirantadas según dos ejes, o formas elípticas o formas de curvatura variable (curvas de varios radios), etc.

El estudio comparado de unas y otras tipologías debe ayudar al ingeniero en la elección de la más adecuada en su caso particular.

A efectos de hacer las comprobaciones de seguridad que más adelante se indican, cualquiera de estas tipologías será representada por una sección transversal equivalente de ancho B.

Esa anchura equivalente debe fijarse de manera que se conserve el área en planta.

En los recintos circulares con trasdós abierto entre celdas se supondrá, a estos efectos, un plano de trasdós virtual que pasa a una distancia $(\pi/4)r$ del eje de la celda, siendo r el radio de la celda.

4.5.2 Factores de proyecto

4.5.2.1 Datos del terreno

Los muelles de recintos de tablestacas pueden construirse en terrenos firmes o de calidad media. Los depósitos de suelos blandos hasta gran profundidad pueden hacer este tipo de solución inadecuada.

Del terreno natural, es preciso conocer su estructura (tipos de terreno en distintos lugares a distintas profundidades) en una zona suficientemente amplia en planta y en profundidad, tal como se recomienda en la Parte 2 de esta ROM.

De cada nivel del terreno, y con más precisión en la zona próxima al cimiento, interesa conocer su naturaleza, su resistencia y su deformabilidad, igual que en otros tipos de muelles (ver apartados 4.2, 4.3 y 4.4).

Se estudiará especialmente la parte del terreno natural que pueda quedar dentro del recinto. La decisión posterior de dragarlo o dejarlo como parte del relleno interior debe ser sustentada por un buen reconocimiento de esta zona.

4.5.2.2 Estudio de materiales

El material del relleno del interior de los recintos interesa que sea granular, de otra manera se producirán grandes tracciones en las paredes de las tablestacas y ello podría conducir a proyectos poco competitivos.

Del material que rellene los recintos ha de conocerse, principalmente, la densidad con la que resultará tras su puesta en obra y el ángulo de rozamiento interno correspondiente, para poder estimar después los grados de seguridad frente a los distintos estados límite.

Dentro del estudio de materiales, debe analizarse la posibilidad de uso de los terrenos naturales del fondo como material de relleno del interior de los recintos.

Del material o materiales de trasdós, interesan los datos relativos a la naturaleza, densidad, resistencia y deformabilidad. En este sentido son aplicables los comentarios correspondientes a los muelles de gravedad (ver apartado 4.2).

En las obras de recintos de tablestacas puede ser interesante la compactación profunda (mediante vibración, por ejemplo) de los rellenos de las celdas. Ese aspecto debe ser investigado en cada caso concreto.

Los materiales para protección contra la socavación del pie del muelle deben estudiarse tal como se ha indicado para otros tipos de muelles (apartados 4.2, 4.3 y 4.4).

4.5.2.3 Niveles de agua

Normalmente la situación más crítica de este tipo de obras corresponderá a una bajamar y con un nivel freático alto en el lado tierra.

Los niveles que han de considerarse son los mismos que se indican para los muelles de gravedad. Ver apartado 4.2.3. A estos efectos y salvo que se tomen precauciones especiales, los muelles de recintos de tablestacas se supondrán impermeables.

Los posibles efectos del oleaje natural o inducido por el tráfico portuario serán también considerados tal como se indica en el apartado 4.2, correspondiente a los muelles de gravedad.

4.5.3 Estados Límite Últimos

Los muelles de recintos de tablestacas tienen formas de rotura propias aún no bien conocidas. Las formas de rotura más típicas, que en cualquier caso han de analizarse, son el objeto de este apartado.

La forma de trabajo de los muelles formados por recintos tablestacados es muy compleja. Durante la fase de relleno de las celdas se producen compresiones del relleno contra las paredes que provocan tracciones importantes en el acero de las tablestacas. La fase crítica de la rotura estructural (tensiones límites en el acero) de los recintos tablestacados se puede producir en esta fase de construcción.

Al realizar las operaciones de dragado en el lado mar (si es que esa operación existe en el proyecto concreto en estudio) se pueden aumentar los esfuerzos en las tablestacas.

Al realizar dragados dentro de los recintos, para eliminar del fondo posibles suelos naturales no convenientes, se pueden producir compresiones en las paredes del recinto. Este aspecto requiere una consideración especial.

Al realizar el relleno de trasdós y sobre todo al utilizar el muelle, colocando las sobrecargas, es cuando se suelen producir las situaciones límite que se contemplan a continuación.

Por esos motivos, aunque el análisis de las operaciones de construcción, siguiendo las distintas fases constructivas, es esencial para verificar el estado tensional en las paredes de las celdas o recintos, esas situaciones, en general, no necesitan ser contempladas para evaluar la seguridad de la obra frente a los Estados Límite de tipo geotécnico, esto es, aquellos controlados por la naturaleza (resistencia, deformabilidad y permeabilidad) del terreno, que son considerados en esta ROM 0.5.

Los Estados Límite Últimos de tipo geotécnico que se contemplan en este apartado son simplificaciones de unas situaciones que se parecen a la realidad observada, tanto en ensayos de prototipos en laboratorio como en casos reales instrumentados, en los que el comportamiento observado ha incluido la rotura (ensayos de laboratorio) o únicamente se ha aproximado a ella ligeramente.

Cuando en los ensayos de laboratorio se empujan las celdas hasta provocar la rotura, ésta puede ocurrir de formas muy variadas, controladas por la tipología de los prototipos y por la relación entre la excentricidad y la inclinación de las acciones sobre la base de la celda.

En general, cuando la excentricidad de esas acciones es pequeña (empujes aplicados a baja altura) el mecanismo que parece controlar la rotura de la celda es el deslizamiento horizontal.

Cuando el punto de aplicación del empuje es alto el mecanismo de rotura es uno de los siguientes:

- ◆ Vuelco de la celda.
- ◆ Rotura por corte de la celda.

A su vez, estos mecanismos teóricos de posible rotura pueden tener morfología diferente según sea la rigidez relativa del material de relleno de los recintos frente a la de sus paredes metálicas.

Independientemente de esos modos de fallo, puede producirse el hundimiento del muelle, como bloque rígido, en aquellos casos en que el cimientado es poco resistente. Cuando el terreno es débil hasta profundidades considerables pueden producirse fallos globales de grandes dimensiones que incluyan al muelle y a su cimientado.

Pueden producirse, en fin, otras situaciones límite locales, como el flujo del relleno de la celda por su parte delantera si las tablestacas, en esa zona, están poco hincadas.

En la Fig. 4.5.3 se ilustran, con unos croquis, estos modos de fallo.

Estos problemas, y otros que el ingeniero pueda concebir, deben ser analizados para garantizar que existe seguridad suficiente frente a cada uno de ellos.

Dado que, en los subapartados que siguen, se contemplan únicamente situaciones límite, los parámetros del terreno que se deben utilizar para realizar estas comprobaciones son aquéllos que corresponden a grandes deformaciones.

Concretamente, en aquellas zonas donde el mecanismo de rotura previsto implique un desplazamiento horizontal de la celda alejándose del terreno, se debe suponer un empuje activo. El empuje será pasivo cuando el desplazamiento relativo sea en sentido contrario.

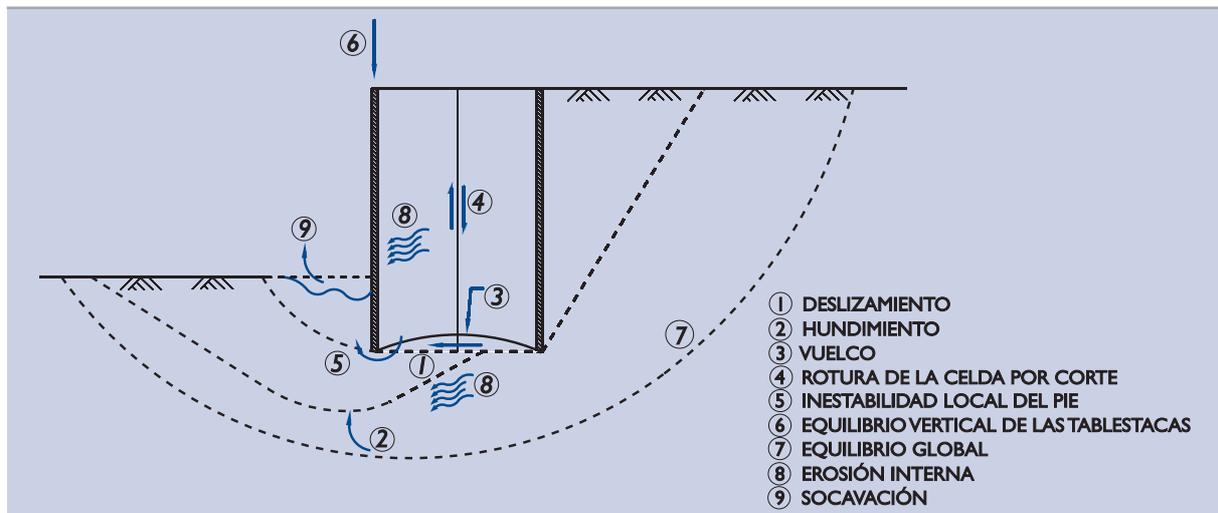
La acción de los empujes del terreno exterior a los recintos contra su pared se supondrá, en general, inclinada un ángulo igual a $2\phi/3$, siendo ϕ el ángulo de rozamiento del suelo del contacto. La dirección del empuje será acorde con el movimiento relativo que se suponga en cada mecanismo de rotura. En general los empujes activos de trasdós estarán inclinados hacia abajo y los empujes pasivos del intradós (parte empotrada en el lado mar) actuarán hacia arriba, tratando de levantar la celda.

Estos criterios generales pueden tener alguna modificación para algunos estados límite particulares de los que aquí se consideran. Si ello fuera así, tal modificación sería indicada, expresamente, en el apartado correspondiente.

Para analizar cada posible modo de fallo se tendrán en cuenta todas las acciones y combinaciones de carga como se estipula detalladamente en la Parte 3 de esta ROM (apartado 3.3).

4.5.3.1 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento

El modo de fallo de deslizamiento que se considera aquí es similar al descrito en otras estructuras de contención de gravedad. Las celdas se desplazarían horizontalmente deslizando según un plano horizontal próximo a su base.

Figura 4.5.3. Modos de fallo geotécnicos en muelles de recintos de tablestacas

Nota: Sólo se incluyen modos de rotura de tipo geotécnico, esto es, controlados principalmente por las características del terreno.

En este caso concreto conviene distinguir, además, dos situaciones según el empuje pasivo que se pueda desarrollar en el pie delantero tenga mayor o menor importancia. Son los casos que se denominan “cimentaciones superficiales” y “cimentaciones empotradas” y que se describen a continuación.

4.5.3.1.1 CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Cuando el muelle apoya sobre un suelo firme o sobre roca y además se utilizan recintos autoestables, bien atirantados, de manera que no se requiera profundizar la hinca de las tablestacas claramente bajo la profundidad del terreno, el mecanismo de deslizamiento como bloque rígido se puede analizar tal como se indica en la Fig. 4.5.4.

Los parámetros geotécnicos c y ϕ a utilizar en el cálculo del coeficiente de seguridad al deslizamiento, según se indica en esa figura, pueden ser los correspondientes al relleno o al terreno de cimentación. Se elegirán los que conduzcan a un coeficiente de seguridad más bajo.

Para el cálculo de los empujes activos del relleno del trasdós sobre la celda se seguirán las recomendaciones que se indican en el apartado 3.7 de esta ROM.

Para calcular el peso específico de las celdas se pueden seguir varios procedimientos. El que se indica en la figura es el que se cree más recomendable y más sencillo.

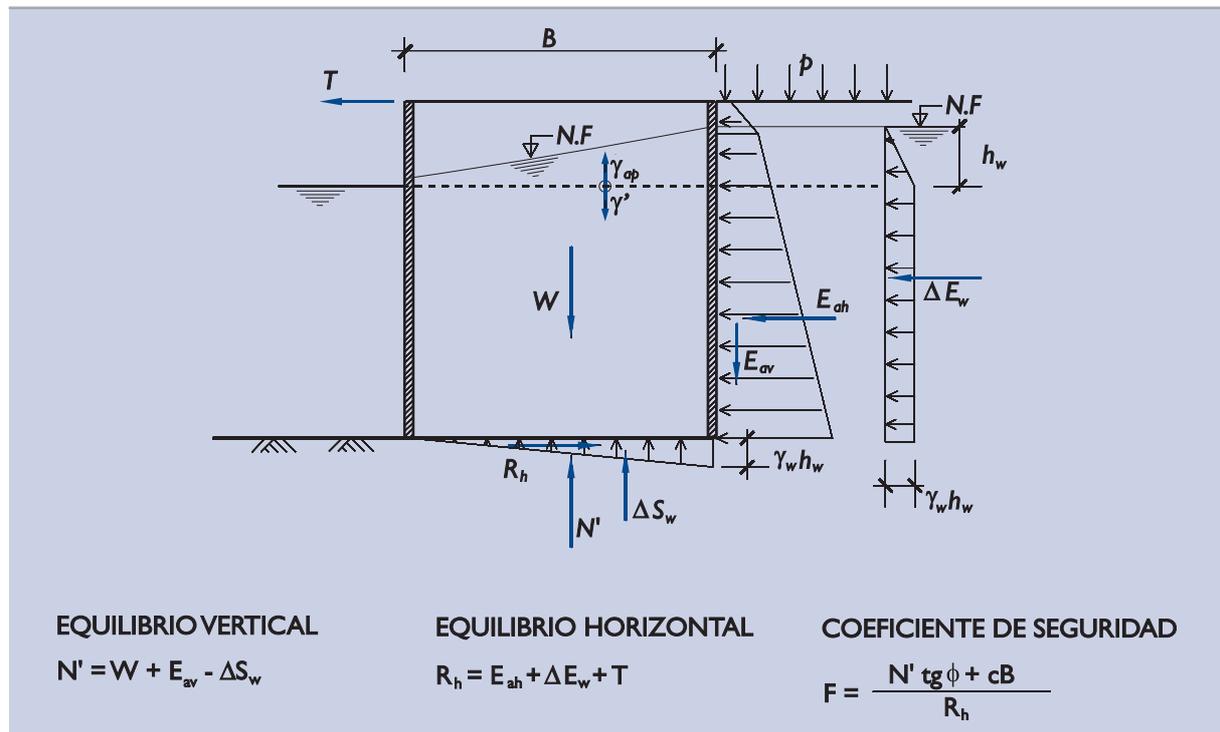
Desde el nivel de agua libre en el mar hacia arriba se utilizarían, para el cálculo de pesos, los pesos específicos aparentes y hacia abajo los pesos específicos sumergidos. Después se debe descontar el exceso de subpresión, ΔS_w en la figura.

El exceso de subpresión depende de la posición del nivel freático dentro de la celda que, en general, será curvo. Se considera admisible suponer que la subpresión en la base de la celda tiene una variación lineal de trasdós a intradós y con unos valores extremos iguales a “ $\gamma_w h_w$ ” en el lado tierra y nulo en el lado mar.

El valor de h_w sería la diferencia de nivel de agua entre el trasdós de la celda y el nivel del mar.

En ocasiones, cuando se disponga de medidas de drenaje especiales que puedan mantener bajo el nivel freático dentro de las celdas, el ingeniero podrá justificar un valor menor de h_w , para el cálculo de las subpresiones.

Figura 4.5.4. Coeficiente de seguridad al deslizamiento en recintos no empotrados



Notas: a) Los pesos se calcularán como producto de las áreas por los pesos específicos aparentes, cuando éstas están situadas por encima del nivel freático del intradós, (γ_{ap}), ó por los pesos específicos sumergidos, (γ'), cuando éstas queden bajo ese nivel.

b) En las ecuaciones de equilibrio figurarán, en cada caso, las fuerzas horizontales y verticales correspondientes a cada caso de carga.

En aquellas ocasiones en las que el tema sea de especial importancia, puede ser conveniente un cálculo previo de la red de filtración local para definir un peso efectivo más adecuado.

También pueden existir ocasiones en las que el peso efectivo de la celda sea realmente menor que el que se obtiene por el procedimiento indicado. Son aquellas situaciones en las que el fondo y las paredes de la celda resultan claramente impermeables. El exceso de subpresión puede llegar a ser hasta el doble del indicado (nivel freático horizontal dentro de la celda situado “ h_w ” sobre el nivel del mar). El ingeniero debe estudiar las posibilidades de esta circunstancia.

4.5.3.1.2 CIMENTACIONES EMPOTRADAS

La cimentación de un muelle de recintos tablestacados sobre suelos requiere hincar las tablestacas hasta una profundidad que será decidida en función de varios factores, entre otros, cumplir los requisitos que se especifiquen respecto al comportamiento estructural (objeto de otra ROM en este Programa de Recomendaciones).

Uno de los motivos de profundizar la hincada de las tablestacas puede ser, precisamente, aumentar la seguridad al deslizamiento del muelle. Esa mejora, sin embargo tiene un límite.

Si se cuenta con la colaboración del empuje pasivo en toda la zona de empotramiento puede ocurrir, a cierta profundidad, que el empuje unitario sea mayor en el exterior de la celda que en su interior. Las paredes de la celda dejarían de trabajar a tracción y la celda podría deformarse peligrosamente.

La profundidad a la que puede ocurrir este hecho es difícil de estimar, ya que el estado tensional en el interior de la celda no es bien conocido. Únicamente se sabe que en su zona exterior estaría sometida (en este meca-

nismo de fallo) al empuje activo en el lado tierra y el pasivo en el lado mar y su estado tensional, en el interior, debe ser alguno intermedio.

De las varias limitaciones posibles la que parece resultar más adecuada es la profundidad “ t_0 ” bajo el nivel del terreno en el intradós.

Esa profundidad sería la longitud de empotramiento mínima de una pantalla virtual anclada al nivel del agua libre y sometida, en su trasdós, al empuje activo del relleno del interior de la celda y, en su pie, al empuje pasivo del terreno de intradós. Esa profundidad se estimaría tal como se indica en el apartado 4.4.5.1 para una pantalla anclada.

En consecuencia y salvo estudios específicos que permitan adoptar otro valor de cálculo, se contará, a efectos de la verificación de la seguridad frente al deslizamiento horizontal, con una profundidad de empotramiento que no será mayor que:

- La profundidad de empotramiento real.
- La profundidad de empotramiento mínima de una pantalla virtual anclada al nivel del agua en el lado mar necesaria para soportar el empuje activo en su trasdós, con las cargas verticales que pudieran existir en el recinto.

Una vez definido el plano de deslizamiento, el proceso de cálculo es similar al de otros deslizamientos planos ya analizados. Los detalles del cálculo se ilustran gráficamente en la Fig. 4.5.5.

Normalmente el coeficiente de seguridad frente al deslizamiento crecerá con la profundidad del plano de deslizamiento “ t ”, de otra manera la posible reducción de empotramiento antes recomendada no debiera practicarse.

La comprobación de que, como ocurre normalmente, la seguridad al deslizamiento crece con la profundidad de empotramiento supuesta en los cálculos puede hacerse repitiendo algún cálculo o según se indica en el comentario que sigue, válido únicamente para deslizamientos según planos horizontales.

Comentario: Cuando las fuerzas actuantes son las indicadas en la Fig. 4.5.5, el coeficiente de seguridad tiene una expresión analítica sencilla en función de la profundidad de empotramiento t .

La derivada de F respecto a t debe ser mayor que cero, de manera que el coeficiente de seguridad crezca con la profundidad de deslizamiento, y eso ocurre cuando el valor de F obtenido en el cálculo es menor que el valor crítico definido por:

$$F_{(\text{crítico})} = \frac{\left(\gamma'_c B + \gamma'_a H^* K_{ah} \cdot \text{tg} \delta_A - \gamma'_p t K_{ph} \cdot \text{tg} \delta_p \right) \text{tg} \phi + B \frac{\partial c}{\partial t} + \gamma'_p K_{ph} \cdot t}{\gamma'_a H^* K_{ah} + \gamma_w h_w}$$

donde:

B = ancho equivalente del muelle a efectos de cálculo (ver 4.5.1) (m).

H^* = altura equivalente de la célula a efectos de este cálculo, obtenida mediante la expresión

$$H^* = \frac{\sigma'_{vo}}{\gamma'_c}, \text{ (m)}$$

σ'_{vo} = tensión efectiva vertical en el pie trasero de la celda al nivel del plano de deslizamiento (kN/m^2).

K_{ah}, K_{ph} = componente horizontal de los coeficientes de empuje.

δ_A, δ_p = inclinación de los empujes, ambos son positivos cuando su inclinación es la habitual de los cálculos. Esto es, empujando hacia abajo, el activo y sosteniendo hacia arriba, el pasivo.

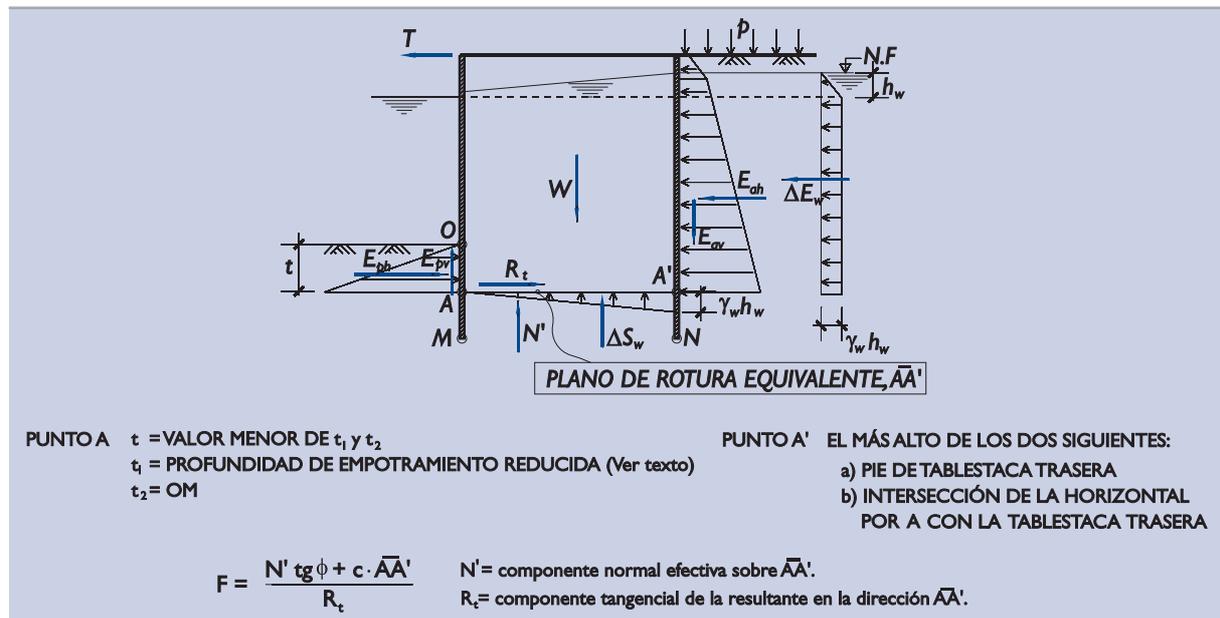
$\partial c / \partial t$ = variación de la cohesión con la profundidad (kN/m^3).

γ_w = peso específico del agua (kN/m^3).

$\gamma'_c, \gamma'_a, \gamma'_p$ = peso específico sumergido del relleno de las celdas, del terreno del trasdós (en el plano de deslizamiento) y del lado mar (en ese mismo plano), respectivamente (kN/m^3).

h_w = desnivel del nivel de agua entre el lado tierra y el lado mar (m).

Figura 4.5.5. Coeficiente de seguridad al deslizamiento en recintos empotrados



En los casos anómalos en los que se identifique que el coeficiente de seguridad decrezca con la profundidad de empotramiento, se debe hacer el cálculo frente al deslizamiento plano para varias profundidades, hasta la cota inferior del tablestacado, para encontrar el nivel al que ocurre el mínimo coeficiente de seguridad.

Si, aún suponiendo la línea de deslizamiento plano pasando por la punta de las tablestacas, el coeficiente de seguridad siguiera disminuyendo, se vigilará especialmente que el equilibrio global del muelle cumple los requisitos debidos.

4.5.3.2 Verificación de la seguridad frente al hundimiento

El hundimiento, como bloque rígido, de las tablestacas y su relleno puede analizarse como si se tratara de una cimentación superficial sobre un plano horizontal que pasara por el pie de las tablestacas del lado mar. Esta recomendación no sería aplicable si las tablestacas apoyaran en roca.

Si las tablestacas traseras (lado tierra) no alcanzan ese nivel, se supondrá, a efectos de este cálculo de seguridad frente al hundimiento, que alcanzan ese nivel y que sobre ellas actúa el empuje activo correspondiente a toda la altura del muelle, desde su coronación hasta el plano horizontal donde se estudie el hundimiento.

Para los recintos que estén muy empotrados en el terreno, se supondrá a efectos de estos cálculos un empotramiento menor, tal como se indica en el apartado 4.5.3.1.2.

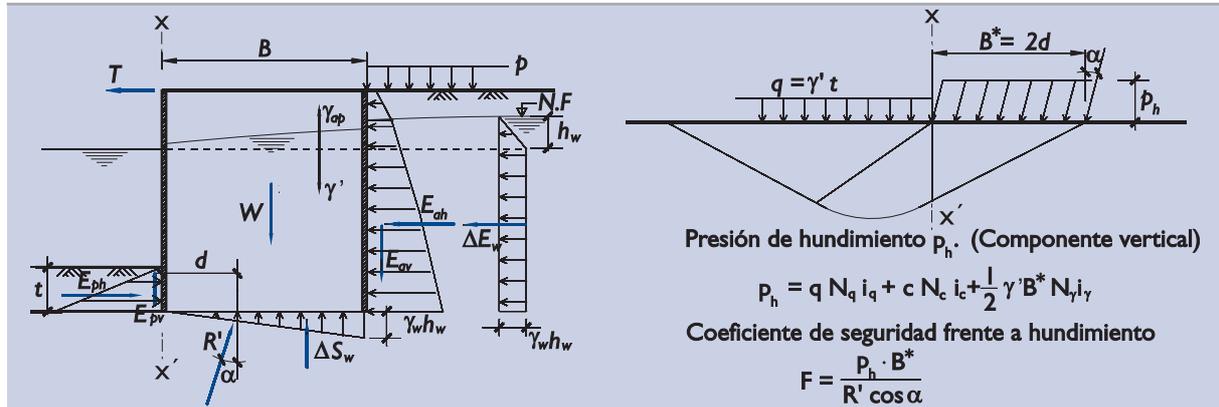
Normalmente la seguridad frente al hundimiento crecerá con la profundidad de empotramiento supuesta en los cálculos. Tal extremo será comprobado y, si la seguridad frente al hundimiento decreciera al aumentar la profundidad del plano de cálculo, no se aplicará la reducción indicada en el párrafo anterior sino aquélla que condujese a un coeficiente de seguridad mínimo.

En ese posible caso anormal se vigilará, además, especialmente el equilibrio global del muelle.

El cálculo del coeficiente de seguridad frente al hundimiento se indica, de manera esquemática, en la Fig. 4.5.6.

Dado que este tipo de rotura no implica necesariamente que exista un desplazamiento relativo vertical en el trasdós, se deberá suponer en los cálculos que el empuje activo actúa horizontalmente, salvo que otra hipótesis, con un ángulo de inclinación positivo (empujando hacia abajo) y menor que $2\phi/3$, conduzca a un coeficiente de seguridad menor.

Figura 4.5.6. Esquema para la evaluación de la seguridad frente al hundimiento



Nota: Para fijar la profundidad de empotramiento "t" a considerar en el cálculo, ver texto.

4.5.3.3 Verificación de la seguridad frente al vuelco

Los recintos de tablestacas tienen una forma de fallo típica, rompiendo por una superficie curva próxima a su base, que se desarrolla dentro del propio relleno de la celda y pasa por los pies de las tablestacas. El centro de curvatura de esas líneas estaría situado por debajo de la base de la celda.

Si el terreno natural es flojo, de resistencia semejante o menor que la del relleno de las celdas, esa línea de rotura puede tener su curvatura en el sentido contrario; se desarrollaría dentro del terreno natural y tendría su centro de curvatura por encima de la base de la celda.

A estos modos de fallo se los denominará aquí vuelco, ya que implican cierta rotación de la celda como sólido rígido y porque conviene distinguirlos del deslizamiento plano estudiado en el apartado anterior.

Actuando en contra del posible vuelco, se deben considerar como fuerzas estabilizadoras las siguientes:

- ◆ Peso propio del muelle contenido en el relleno de ancho virtual B.
- ◆ Empuje pasivo en el lado mar.
- ◆ Posibles sobrecargas sobre los recintos y otras acciones estabilizadoras.

A favor del posible vuelco actuarían, como fuerzas volcadoras, las siguientes:

- ◆ Empuje activo del terreno y debido a las sobrecargas.
- ◆ Empuje debido al desnivel de agua entre el trasdós y el lado mar.
- ◆ Fuerzas horizontales hacia el mar transmitidas al recinto.
- ◆ Posibles cargas y otras acciones desestabilizadoras.

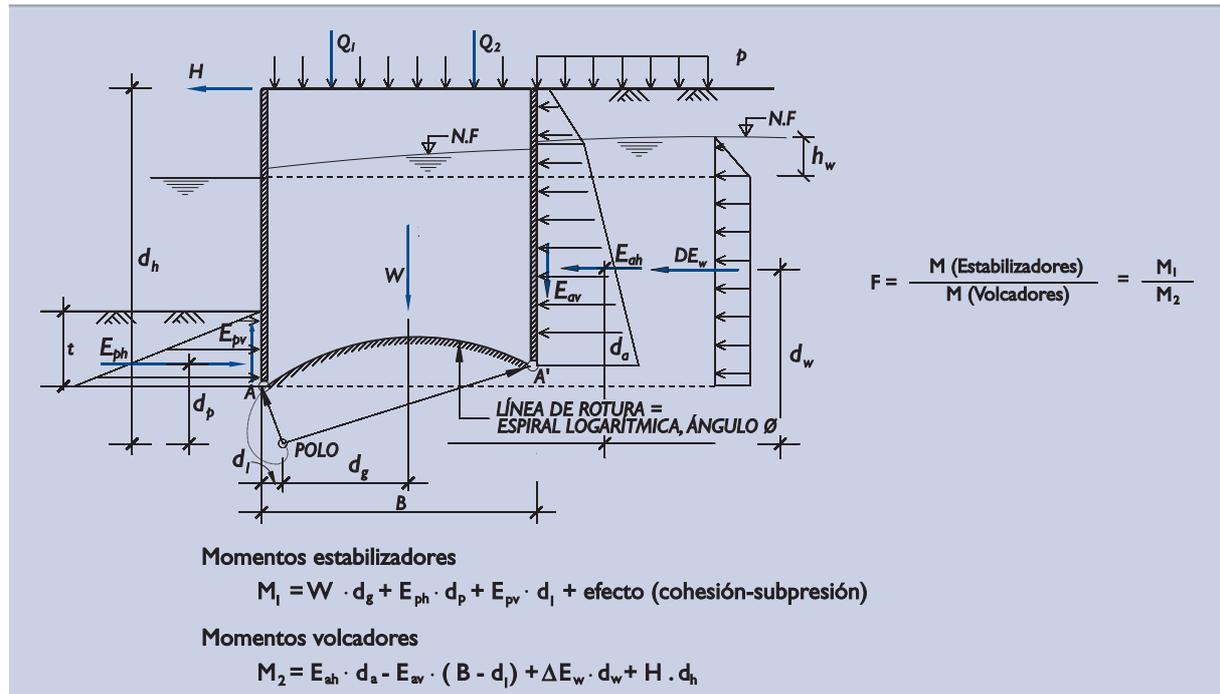
Vuelco modo I

El empuje pasivo en la zona de empotramiento del lado mar es una fuerza estabilizadora importante de manera que la profundización de las tablestacas es, en general, una medida que asegura la estabilidad.

Sobrepasada cierta profundidad, sin embargo, pueden aparecer esfuerzos importantes en la parte inferior de las tablestacas y, por eso, salvo que se tomen medidas especiales y se demuestre su eficacia, se tomará, a efectos de cálculo, una profundidad de empotramiento reducida tal como se indica en 4.5.3.1.2.

El esquema de cálculo del coeficiente de seguridad frente a este tipo de vuelco, denominado modo 1, se define con la ayuda gráfica de la Fig. 4.5.7.

Figura 4.5.7. Coeficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 1



Nota: Para "efecto cohesión-subpresión" ver texto.

Los pesos efectivos cuya resultante es "W" se calcularán con los pesos específicos que se indican en la Fig. 4.5.4.

El momento respecto al polo de otras posibles acciones será contabilizado como volcador o como estabilizador según tienda a estabilizar o a volcar.

Para situar los puntos A y A' ver Fig. 4.5.5.

Vuelco modo 2

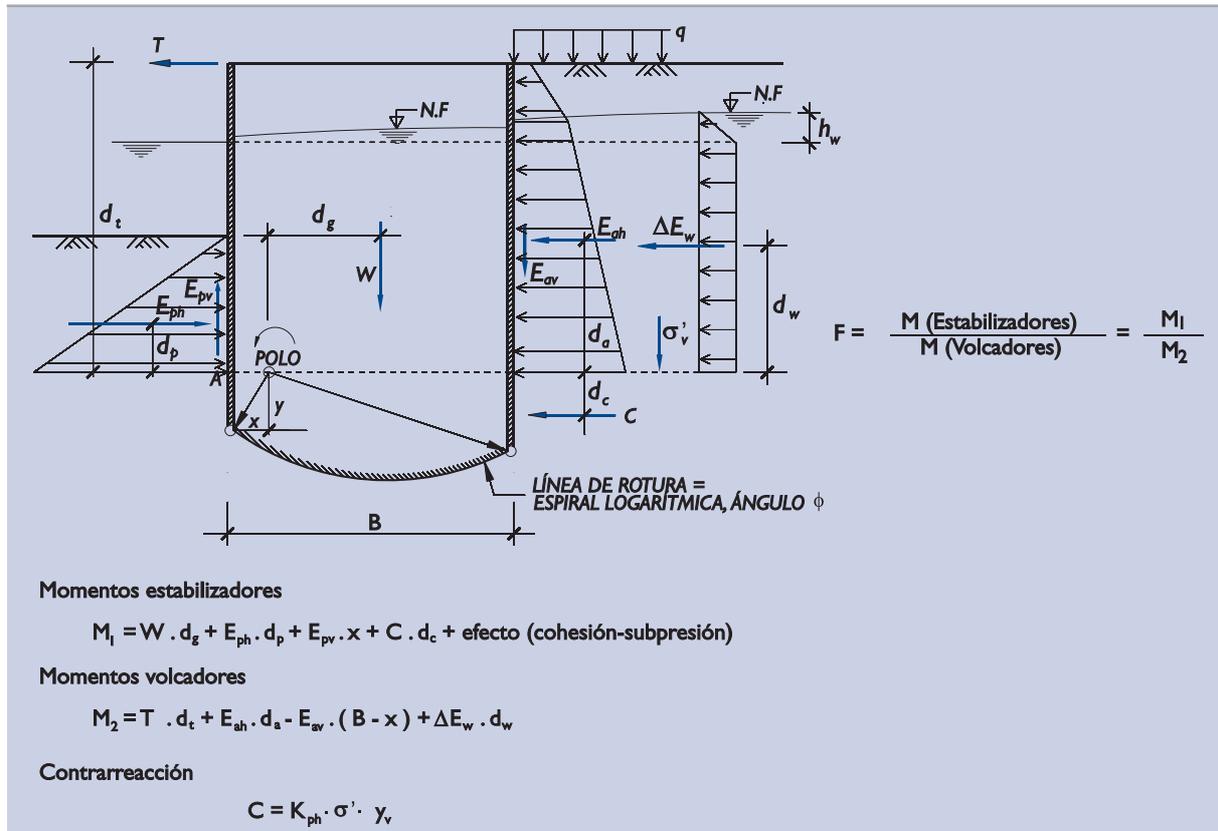
En aquellos casos en los que la profundidad de empotramiento real sea mayor que la utilizada en el cálculo precedente (vuelco modo 1), así como en aquéllos en los que el terreno natural sea menos resistente que el del relleno de las celdas, se comprobará además otro segundo modo de fallo por vuelco definido como modo 2 e ilustrado en la Fig. 4.5.8.

En ambos casos la línea de rotura es una espiral logarítmica de ángulo ϕ igual al ángulo de rozamiento en la línea de rotura. Este tipo de mecanismos tiene la ventaja fundamental de simplificar los cálculos pues en suelos puramente friccionales ($c = 0$) la resultante de las acciones contra el terreno (igual que la de las reacciones del terreno) ha de pasar por el polo y por lo tanto dar, en él, momento nulo cuando se produce la rotura.

En general el momento que producen, respecto al polo, las acciones estabilizadoras es mayor que el que producen las fuerzas desestabilizadoras y sólo un aumento de éstas puede conducir a la condición de rotura.

El coeficiente de seguridad puede calcularse, para una determinada línea de rotura, definida por su polo, como el coeficiente por el que han de multiplicarse las fuerzas volcadoras (o sus momentos, ya que los brazos

Figura 4.5.8. Coeficiente de seguridad frente al vuelco. Modo 2



Nota: Para "efecto cohesión-subpresión" ver texto.

Los pesos efectivos cuya resultante es "W" se calcularán con los pesos específicos que se indican en la Fig. 4.5.4.

El momento respecto al polo de otras posibles acciones será contabilizado como volcador o como estabilizador según tienda a estabilizar o a volcar.

son fijos, una vez definida la línea de rotura) de manera que los momentos respecto al polo se anulen, tal como se indica en las figuras comentadas.

El coeficiente de seguridad que se obtiene es poco sensible a la ubicación del polo cuya situación pésima, sin embargo, ha de buscarse mediante tanteos sucesivos.

Comentario: A efectos de facilitar el cálculo de estabilidad según líneas espirales se facilita, en la Fig. 4.5.9, el dibujo de varias curvas de ese tipo.

El lugar geométrico de los polos de las distintas espirales logarítmicas que pasan por dos puntos fijos se incluyen en la Fig. 4.5.10.

Para facilitar los cálculos de estabilidad se traen aquí algunas fórmulas prácticas que pueden ser de ayuda.

Para considerar el posible efecto de la cohesión como momento favorable en aquellos casos en que la línea de rotura corte un terreno con cohesión, se recuerda que tal momento es:

$$M_{(\text{cohesión})} = \frac{1}{2} c \cdot \cot \phi (\rho_1^2 - \rho_0^2)$$

donde:

c = cohesión.

ϕ = ángulo de la espiral de cálculo.

ρ_0, ρ_1 = radios polares de los extremos de la zona con cohesión.

También se recuerda que el área encerrada entre la espiral logarítmica y la cuerda que une sus dos puntos extremos es:

$$\text{Área} = \frac{1}{4\text{tg}\phi} (\rho_1^2 - \rho_0^2) - \frac{1}{2} \rho_0 \rho_1 \text{sen}\Omega$$

donde:

Ω = ángulo que forman entre sí los dos radios polares extremos ρ_0 y ρ_1 .

y donde los otros parámetros tienen el significado indicado en el párrafo anterior.

La subpresión en la línea de rotura A-A' está contabilizada en su mayor parte al considerar los pesos estabilizadores como sumergidos a partir de la línea de agua en el lado mar. El exceso de subpresión en la línea de rotura sería decreciente entre un valor $\gamma_w \cdot h_w$ en el trasdós y cero en el intradós. El efecto de esa subpresión adicional se puede tener en cuenta reduciendo el momento estabilizador en la cantidad:

$$M_{(\text{subpresión})} = \frac{1}{3} \gamma_w h_w (\rho_1^2 - \rho_0^2)$$

Esta fórmula es aproximada y por lo tanto cuando este momento sea importante, debe utilizarse un cálculo más adecuado.

Figura 4.5.9. Espirales logarítmicas para distintos ángulos de rozamiento

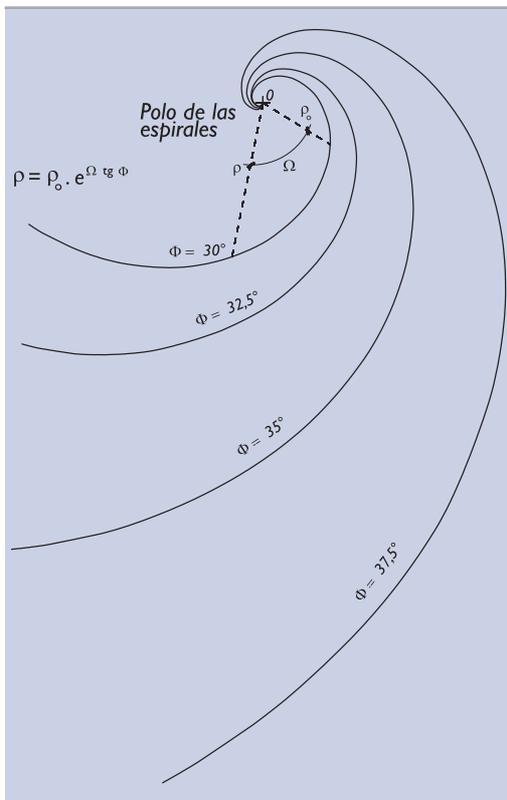
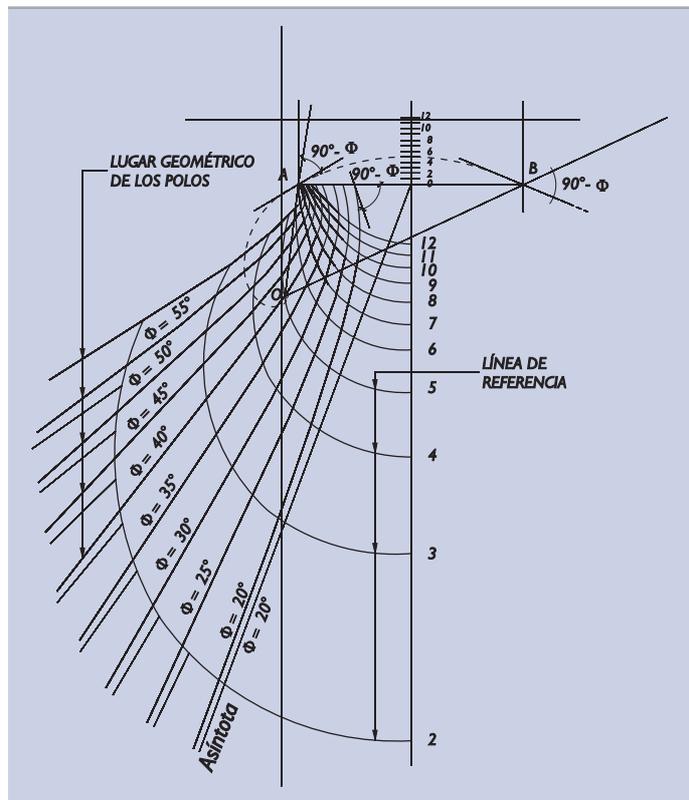


Figura 4.5.10. Lugar geométrico de los polos de las espirales logarítmicas (3)



(3) Tomado de R. Jelinek, H. Ostermayer. Zur Beruchnung von Fandedämmer und verankerten Spundwänden. Bautechnik. Mai 1967.

4.5.3.4 Verificación de la seguridad frente a la rotura de la celda

Los muelles de recintos tablestacados han de transmitir los esfuerzos que actúan en su trasdós y en su cabeza hacia el terreno de cimentación de manera que éste los reciba con la menor excentricidad y la menor inclinación posibles.

El cuerpo de las celdas está sometido, como estructura, a unos esfuerzos (resultantes de la integración de tensiones según distintos planos que lo cortan) que deben ser soportados por el conjunto del relleno y de las tablestacas que lo confinan.

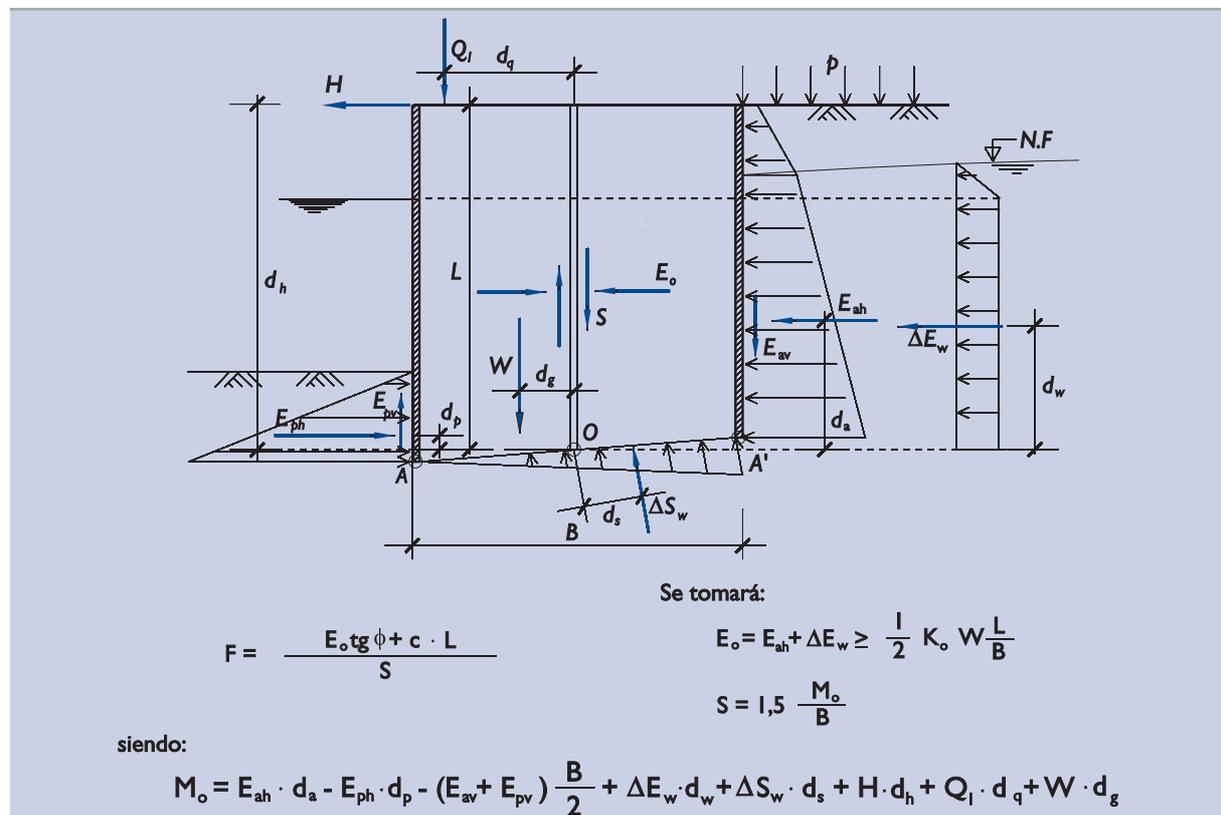
El esfuerzo cortante según planos horizontales es relativamente fácil de calcular. Tal como se ha hecho en apartados precedentes para planos horizontales próximos a la base de los recintos, se puede hacer para planos horizontales a mayores cotas. La rotura según esos planos horizontales está controlada no sólo por el relleno de las celdas, sino también por la resistencia al corte de las propias tablestacas. Es un mecanismo que debe evaluarse en el contexto del cálculo estructural de las paredes.

En el plano vertical central, equidistante de ambos paramentos de cierre de las celdas, existe un esfuerzo de corte "S" y una compresión normal efectiva "E_o" que deben ser estimados para verificar que están lejos de agotar la capacidad resistente de las celdas.

En ese tipo de corte hipotético, la contribución de las tablestacas a la resistencia de las celdas es pequeña ya que implica un deslizamiento a lo largo de la unión en la zona media, donde la tracción no debe ser muy alta (en los recintos formados por doble pared no existen tablestacas cortadas en ese plano central).

Olvidando la contribución de la resistencia estructural al deslizamiento de estas uniones, se puede definir un valor del coeficiente de seguridad frente al corte vertical como el que se ilustra en la Fig. 4.5.11.

Figura 4.5.11. Coeficiente de seguridad frente a la rotura de la celda



La resultante de las acciones sobre la base de la celda, referidas a su centro "O", provocan un momento volcador "M_o" que se supone soportado por un par de fuerzas de intensidad "S" y de brazo 2/3 B. Las cargas verticales centradas serían soportadas por reacciones uniformes que no generarían tensiones de corte en el plano vertical en estudio.

Antes de que se coloquen los rellenos del trasdós y después de rellenar las celdas, existen unas tensiones de compresión horizontal efectiva en el relleno del interior de las celdas que se pueden evaluar, a estos efectos, en:

$$\sigma'_{H} = K_o \sigma'_{v}$$

lo que conduce a una estimación de la compresión efectiva en el plano de estudio:

$$E_o = K_o \int_0^L \sigma'_{v} dz$$

Esta integral, que se extiende a lo largo del plano de estudio, puede calcularse aproximadamente suponiendo una variación lineal de las presiones con la profundidad:

$$E_o = \frac{1}{2} K_o \cdot \sigma'_{v(\text{máx})} \cdot L = \frac{1}{2} K_o \frac{L}{B} \cdot W$$

Este valor de E_o es el que se indica en la Fig. 4.5.11. Normalmente, para rellenos de arena, se supone K_o = 0,4, valor este que parece un límite inferior de los encontrados en la práctica.

El empuje activo de las tierras del trasdós, debido a su peso, así como a las sobrecargas que hubiere, más el empuje del agua, debido al desnivel del nivel freático entre el lado tierra y el lado mar, comprimen la celda. La suma de esos empujes sería similar a la compresión efectiva en el plano de estudio. Parte de esa compresión horizontal se transmite directamente al terreno de cimentación pero, como quiera que la parte trasera de la cimentación está menos cargada, se supone que ese efecto es despreciable. Así se ha definido el valor del límite superior de E_o en la figura que se comenta.

En el método simplificado que se recomienda, se adopta este valor de la compresión efectiva siempre que sea mayor que el existente antes de trasdosar y cargar el muelle.

A falta, por lo tanto, de un procedimiento más apropiado que el ingeniero pudiera justificar, se considerará como coeficiente de seguridad frente al corte vertical el definido en la mencionada figura.

La longitud de empotramiento en el pie delantero, salvo disposiciones especiales y a efectos de realizar estos cálculos, será limitada según se indica en 4.5.3.1.2.

4.5.3.5 Verificación de la seguridad frente a la inestabilidad local del pie

El entorno del pie delantero de los muelles de recintos tablestacados puede ser un punto especialmente conflictivo cuando las tablestacas están poco hincadas.

El ingeniero debe comprobar que se dispone de seguridad suficiente al menos contra los Estados Límite que se describen a continuación, además de otros que él pueda concebir.

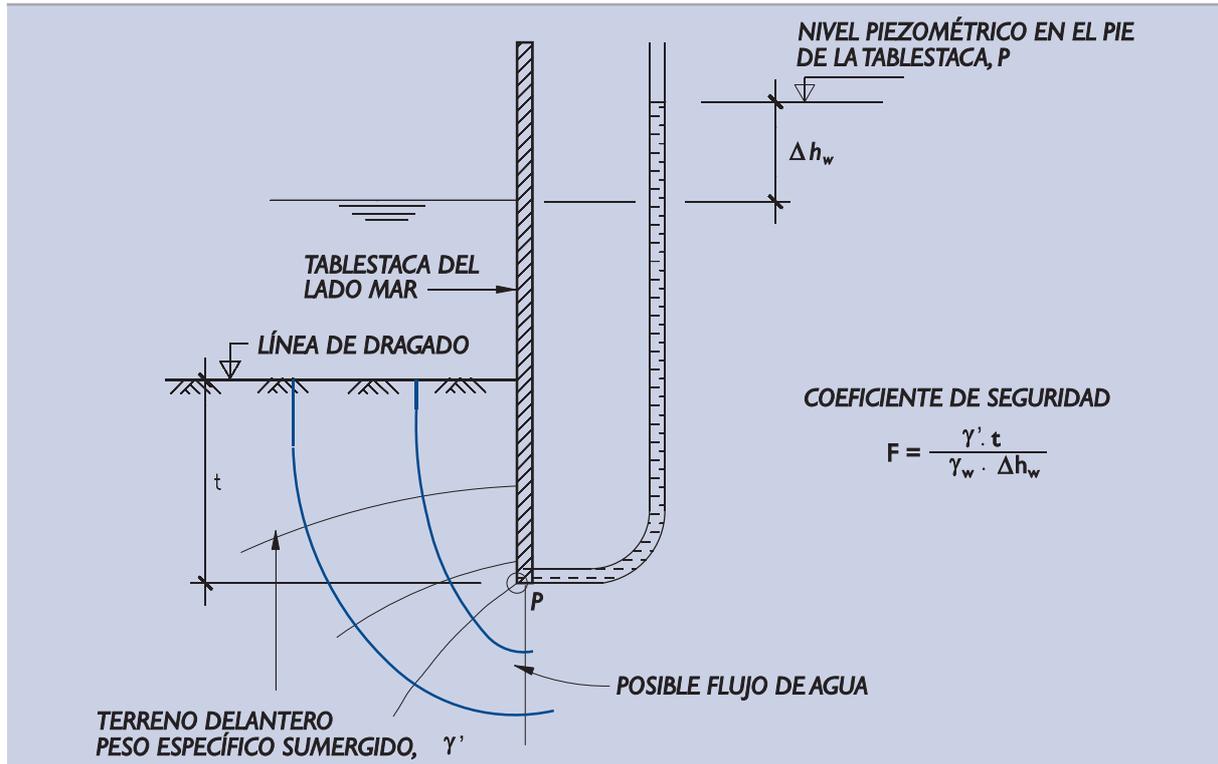
a. Verificación de la seguridad frente al levantamiento del terreno en el pie

En la parte delantera del muelle puede existir un flujo ascendente del agua causado, entre otros posibles motivos:

- ◆ Por efecto de las mareas y el oleaje.
- ◆ Por efecto de las lluvias que eleven el nivel freático en el interior de las celdas.
- ◆ Por corrientes, naturales o artificiales, de agua desde el lado tierra

El ingeniero debe estimar, para cada situación de proyecto, el máximo desnivel piezométrico entre el pie de la tablestaca, en el lado mar, y la línea de dragado, valor denominado Δh_w en la Fig. 4.5.12.

Figura 4.5.12. Seguridad frente al levantamiento del terreno en el pie



El coeficiente de seguridad frente a este mecanismo de fallo se define como el cociente entre el gradiente crítico que provocaría la rotura por sifonamiento:

$$I_{(\text{crítico})} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

donde:

γ' = peso específico sumergido del terreno en el entorno del pie
 γ_w = peso específico del agua

y el gradiente estimado:

$$I_{(\text{estimado})} = \frac{\Delta h_w}{t}$$

esto es:

$$F = \frac{I_{(\text{crítico})}}{I_{(\text{estimado})}}$$

Para hacer esta definición de la seguridad, se ha supuesto que el terreno que atraviesa el flujo de agua entre el punto P (pie de la tablestaca) y el nivel del terreno en el pie del muelle es de permeabilidad homogénea. Si eso no fuera así, se tomará como punto de cálculo P el de contacto del recinto con la base del estrato más impermeable atravesado por la tablestaca.

b. Verificación de la seguridad frente a la plastificación del pie

El estado tensional en el interior del recinto tablestacado, cerca de su pie delantero, se puede estimar con ayuda de los resultados de los cálculos realizados para comprobar la seguridad frente al hundimiento. En efecto, si las resultantes de las acciones efectivas sobre la cimentación, referidas al centro de la base de la celda, son:

- N_o = compresión normal efectiva resultante en la base de la celda.
- H = componente horizontal de la resultante.
- M_o = momento respecto al centro de la base de la celda de las fuerzas anteriores.

El límite superior de la tensión vertical en el entorno del pie delantero se puede estimar suponiendo una distribución lineal de tensiones, esto es:

$$\sigma'_{v1} = \frac{N_o}{B} + \frac{6M_o}{B^2}$$

También se puede estimar la tensión cortante, que a falta de un procedimiento más adecuado, que se pudiera justificar, se supondrá:

$$\tau = \sigma'_{v1} \cdot \frac{H}{N_o}$$

En el Estado Límite Último que se considera, el terreno estaría plastificado en ese punto y eso permite calcular las tensiones que existirían en un plano vertical que se denominan, en la Fig. 4.5.13, con las notaciones σ'_H y τ .

En la zona del intradós (lado mar) deben existir, sobre el plano vertical, las mismas tensiones σ'_H y τ . Sobre un plano horizontal actuaría una tensión vertical efectiva σ'_{v2} .

El valor de σ'_{v2} se puede estimar en:

$$\sigma'_{v2} = \gamma_2^* \cdot t$$

En este caso se debe suponer, como dato de peso específico de cálculo, el valor sumergido disminuido por el efecto del posible gradiente hidráulico ascendente que pudiera existir; esto es:

$$\gamma_2^* = \gamma_2 - I_v \cdot \gamma_w$$

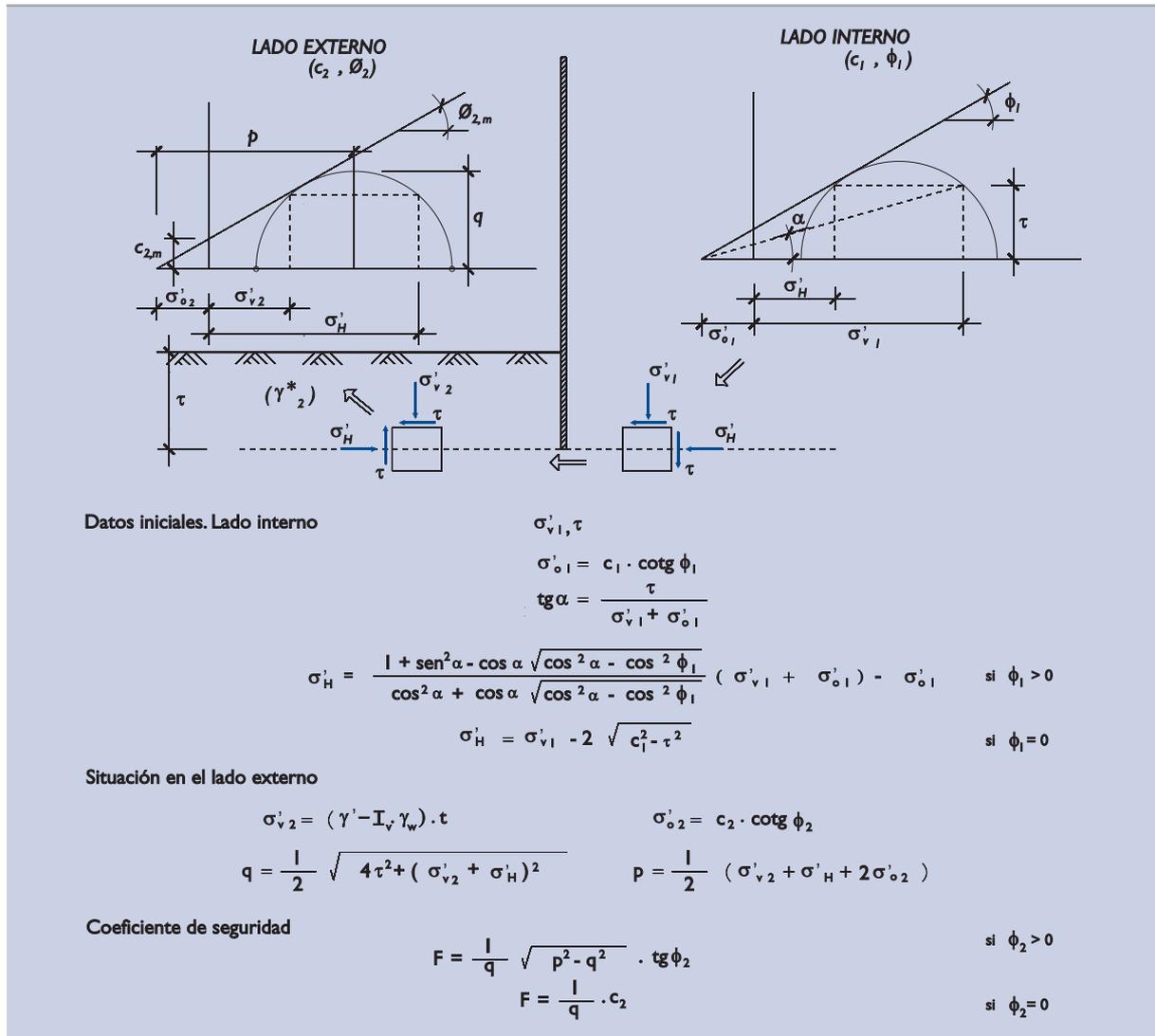
Una vez conocidas las tensiones en el pie de la pantalla se puede determinar la resistencia necesaria para que en esta zona esté en equilibrio tensional estricto ($c_{2,m}$, $\phi_{2,m}$).

La comparación de la resistencia del terreno frente a la tablestaca (c_2 , ϕ_2) en el pie delantero del muelle, con la necesaria para el equilibrio tensional estricto, permite definir un coeficiente de seguridad:

$$F = \frac{\text{tg}\phi_2}{\text{tg}\phi_{2,m}} = \frac{c_2}{c_{2,m}}$$

En la Fig. 4.5.13 se indican unas fórmulas analíticas que pueden facilitar el cálculo asociado a esta comprobación de la plastificación del pie.

Figura 4.5.13. Comprobación tensional en el entorno del pie del muelle



Por otro lado, se advierte que en los muelles de pantallas paralelas, que no estén arriostrados en el fondo, la rotura del pie por empuje horizontal debe analizarse como en el caso general de pantallas ancladas, para obtener la hincia mínima necesaria, según se indica en el apartado 4.4.5.

4.5.3.6 Verificación de la seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas

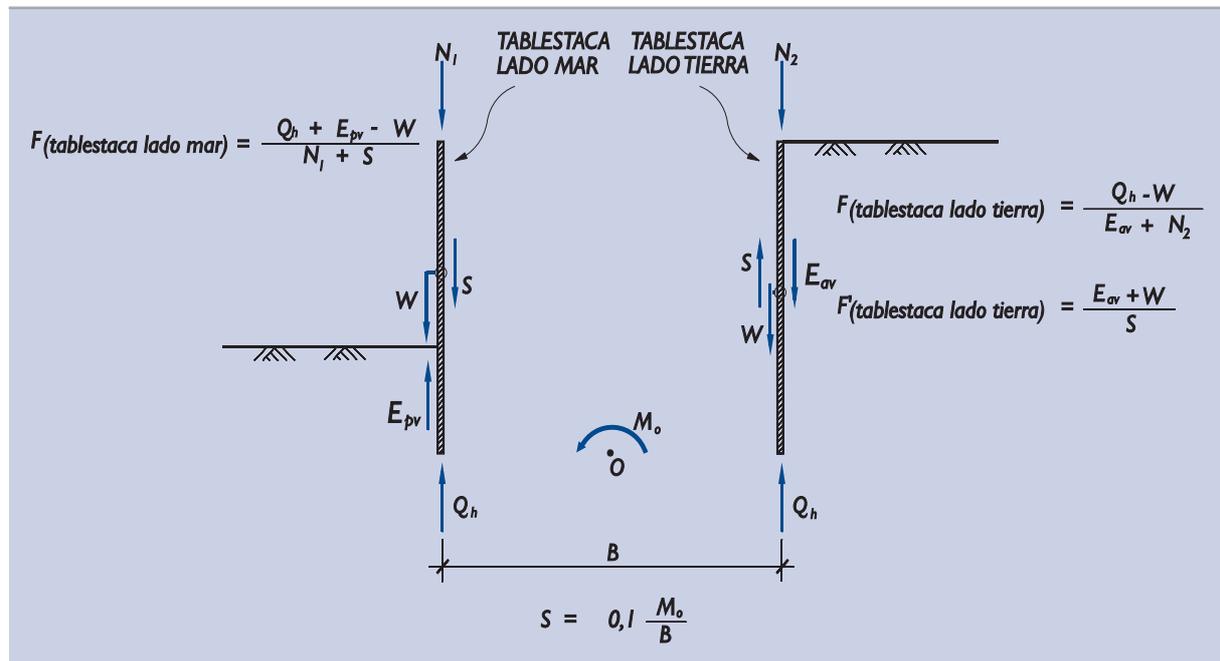
Las tablestacas están sometidas a esfuerzos tangenciales en sus paredes y a posibles cargas verticales en su cabeza, de manera que podrían hundirse o levantarse verticalmente.

En la Fig. 4.5.14 se indican esquemáticamente las fuerzas que, por metro lineal de tablestaca, pueden actuar en dirección vertical.

TABLESTACA DEL LADO MAR

En el lado mar la tablestaca puede estar solicitada por alguna carga vertical en su cabeza, denominada N_1 , además de la posible componente vertical del empuje del relleno de la celda, denominada S .

Figura 4.5.14. Seguridad frente al equilibrio vertical de las tablestacas



Nota: M_o = momento respecto al centro del cimiento de las fuerzas actuando por ml de muelle

A efectos de esta comprobación se supondrá que S es tal que las tablestacas colaboran, mediante su capacidad resistente vertical, en soportar una parte reducida de la flexión del recinto. En la mencionada figura se cifra esa colaboración en un 10% del total.

En el lado mar se puede contar, como fuerza vertical resistente, la componente vertical del empuje pasivo, que habrá sido estimada en cálculos previos. Se le añadiría la resistencia al hundimiento por punta, estimada como se indica en el apartado 3.6 de esta ROM y se le restaría el peso de la tablestaca.

El coeficiente de seguridad frente al hundimiento vertical de la tablestaca del lado mar se define como el cociente:

$$F = \frac{Q_h + E_{pv} - W}{N_1 + S}$$

TABLESTACA DEL LADO TIERRA

La tablestaca del lado tierra está sometida, principalmente, a la acción vertical debida al empuje de tierras y sobrecargas, tal como se indica con la fuerza E_{av} en la Fig. 4.5.14. Estará sometida también a unas fuerzas debidas al rozamiento del relleno de las celdas con la pared, fuerza "S" en la figura mencionada.

Esta fuerza "S" puede variar, siendo hacia abajo durante construcción y siendo hacia arriba en algunos casos de carga que impliquen flexiones importantes de los recintos.

A efectos de esta comprobación, se calcularán dos coeficientes de seguridad frente al movimiento vertical. Uno suponiendo que este ocurre hacia abajo (hundimiento), definido por:

$$F = \frac{Q_h - W}{E_{av} + N_2}$$

en el que no se cuenta con ninguna fuerza “S” y otro coeficiente, suponiendo que el deslizamiento ocurre hacia arriba y en el que la estimación hecha de la fuerza “S” ha de ser soportada por el rozamiento de la tablestaca con el trasdós, esto es:

$$F = \frac{E_{av} + W}{S}$$

En aquellos casos en los que existan otras posibles fuerzas verticales que entren en el proceso, se deberán modificar las ecuaciones anteriores, manteniendo el espíritu que ha guiado su formulación.

4.5.3.7 Verificación de la seguridad frente al equilibrio global

El equilibrio global de los muelles de recintos tablestacados es esencialmente igual que el de los muelles de gravedad.

Las recomendaciones indicadas en 4.2.3.5 son aplicables a los muelles de recintos tablestacados.

4.5.3.8 Verificación de la seguridad frente a la erosión interna

La erosión interna, con arrastres de partículas finas del relleno de los recintos o del trasdós del muelle, puede producirse a favor de corrientes de agua, ya sean estas naturales y preexistentes, o creadas por la presencia del propio muelle.

El posible flujo de agua dentro del relleno de las celdas puede provocar el arrastre de materiales finos a través de defectos en las paredes, o bien a través del fondo de la celda.

A efectos de prevenir el vaciado del relleno de la celda debido a algún defecto en las juntas, es recomendable inspeccionar los recintos antes de proceder a su llenado.

A efectos de evitar el arrastre por el fondo, se dispondrá la primera capa de relleno, en contacto con el fondo, un material granular que sirva de filtro entre el terreno natural y el fondo de las celdas.

En cuanto al relleno del trasdós de las celdas, se atenderá a las recomendaciones del apartado 4.4.5.7 correspondiente a los muelles de pantallas.

4.5.3.9 Verificación de la seguridad frente a la socavación

En cuanto a socavación del pie delantero, se atenderán las recomendaciones del apartado 4.4.5.8 correspondiente a los muelles de pantallas.

4.5.3.10 Resumen de los coeficientes de seguridad mínimos

Los coeficientes de seguridad mínimos recomendados para los distintos modos de fallo considerados en los apartados precedentes son los indicados en la Tabla 4.5.1.

4.5.4 Estados Límite Últimos del tipo agotamiento estructural

El cálculo estructural de los muelles de recintos tablestacados estará encaminado a decidir, entre otros aspectos, la capacidad estructural de las tablestacas.

Tabla 4.5.1. Coeficientes de seguridad mínimos para muelles de recintos de tablestacas. Obras ISA bajo (5 a 19)

Modos de fallo	Tipo de combinación		
	Cuasi-Permanentes, F ₁	Fundamentales, F ₂	Accidentales o sísmicas, F ₃
Deslizamiento	1,5	1,3	1,1
Hundimiento	2,5	2,0	1,8
Vuelco	1,5	1,3	1,1
Rotura de la celda	1,5	1,3	1,1
Inestabilidad local del pie:			
a) Levantamiento	1,5	1,3	1,1
b) Plastificación	1,5	1,3	1,1
Equilibrio vertical de las tablestacas	2,5	2,0	1,8
Equilibrio global	1,4	1,3	1,1

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.5.

Nota 2: Atendiendo al carácter de la obra y a la duración de la situación de proyecto, se deberán hacer las modificaciones mencionadas en 3.3.8 y 3.3.10 a los efectos de aumento o reducción de los coeficientes de seguridad recomendados.

En cada punto del tablestacado del recinto y en cada fase de ejecución, existirán unas tensiones diferentes y distintas, además, entre unas y otras tipologías de muelles.

En los muelles formados por recintos circulares o por recintos con diafragmas, la experiencia indica que la máxima compresión del relleno contra las paredes es proporcional a la compresión vertical efectiva, en buena parte de la altura de las celdas.

El coeficiente de proporcionalidad K es del orden de 0,4-0,6 durante construcción, según se sabe por las escasas experiencias donde existen mediciones. Ese coeficiente, además, parece disminuir en la zona profunda, de manera que el empuje horizontal máximo se alcanza a una profundidad $z = 3/4 H$, en muelles apoyados sobre roca (celdas no empotradas), o al nivel de dragado, esto es para $z = H$, en celdas parcialmente empotradas.

Parece, por las experiencias publicadas, que a lo largo del tiempo el coeficiente K disminuye algo, quizás un 10% o un 20% en la zona central y alta de las celdas, y aumenta ligeramente, en cantidades similares, en la zona baja de la celda.

Cuando el muelle se trasdosa, las presiones a uno y otro lado de las paredes de las celdas tratan de equilibrarse, reduciéndose las tracciones en las paredes, excepto en el lado mar donde las paredes siguen estando sometidas a tracciones similares.

Usualmente, la tracción horizontal entre tablestacas se calcula con la sencilla fórmula de los tubos que se indica en la Fig. 4.5.15.

Además del esfuerzo principal de tracción, existen esfuerzos secundarios de flexión, que originan tracciones verticales, así como esfuerzos de corte (ver apartado 4.5.3.4), que han de ser considerados en el proyecto estructural.

En los recintos formados por dos filas de tablestacas paralelas atirantadas, la forma de trabajo de los elementos metálicos es esencialmente a flexión y el estudio estructural es similar al que pueda hacerse en los muelles de pantallas atirantadas.

Aunque el problema estructural es clave en este tipo de muelles, se ha avanzado poco en el conocimiento real del estado tensional en las tablestacas y por eso se suelen utilizar coeficientes de seguridad amplios.

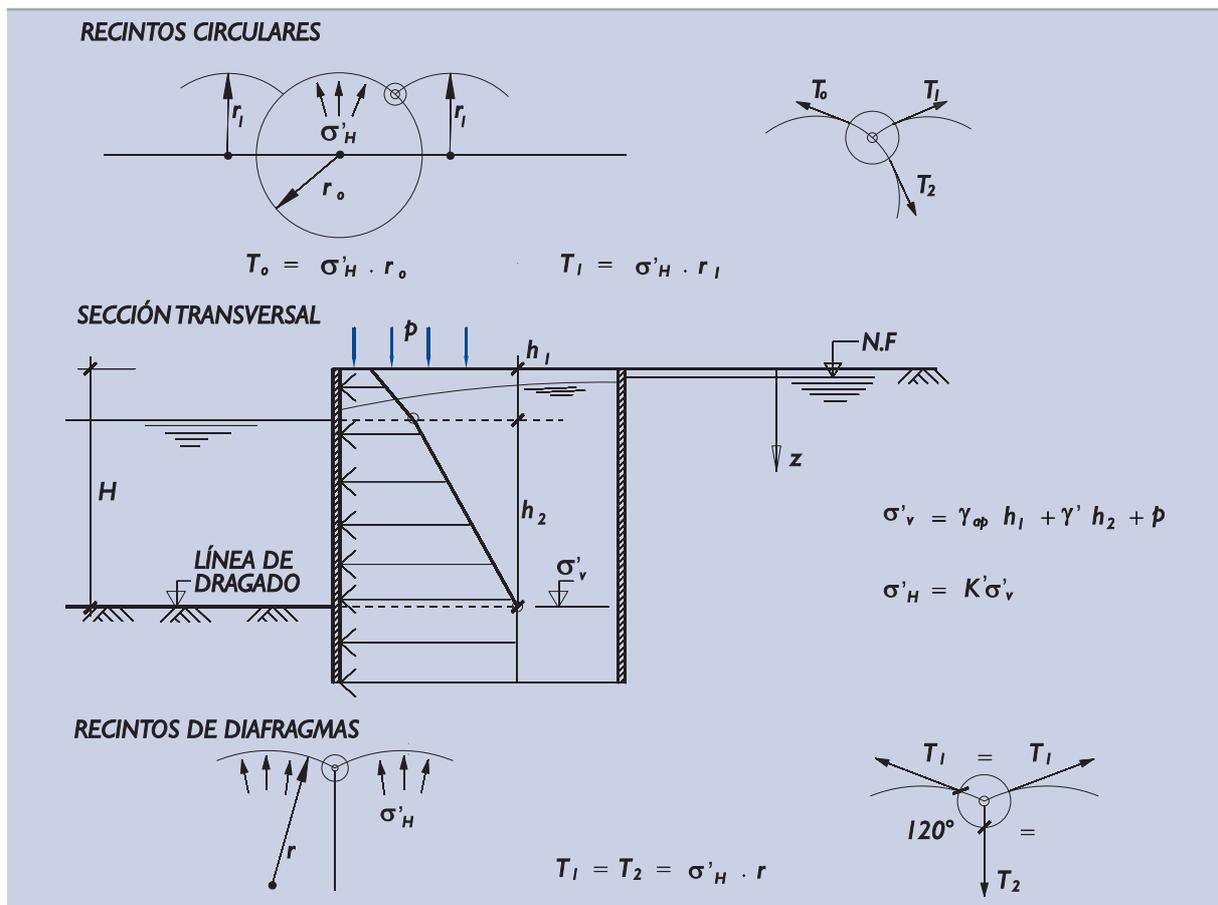
En cualquier caso, como ya se ha dicho, el asunto del proyecto estructural no cae en el ámbito de esta ROM 0.5. Será objeto de futuros documentos de este Programa.

4.5.5 Estados Límite de Servicio

Los muelles de recintos tablestacados son más deformables que los de otras tipologías de gravedad (bloques o cajones). En ocasiones, será necesario verificar el estado límite de deformaciones, a cuyos efectos se dan algunas recomendaciones en lo que sigue.

Los movimientos de un muelle de recintos tablestacados pueden descomponerse en dos partes, una debida al terreno de cimentación y otra debida al relleno de las celdas.

Figura 4.5.15. Esquema de los esfuerzos de tracción en las paredes



Los movimientos debidos a la deformabilidad del cimientto (asientos, desplazamientos horizontales y giros) pueden estimarse siguiendo las indicaciones relativas a los muelles de gravedad (ver apartado 4.2.4).

Los movimientos adicionales ocasionados por la deformabilidad de los recintos pueden calcularse asimilándolos a una viga de corte ⁽⁴⁾.

A una determinada altura del muelle "y", medida desde la base, existe un esfuerzo de corte horizontal, que puede estimarse suponiendo que el empuje en el lado tierra es activo y en el lado mar es únicamente una fracción del empuje pasivo, ya que tal empuje sólo sería movilizadado en casos próximos al límite de rotura por deslizamiento.

(4) Elemento lineal cuya deformación es exclusivamente debida a los esfuerzos cortantes.

La deformación angular que ocurre a un nivel “y” sería:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{Q}{B \cdot G}$$

Donde B es el ancho del recinto y G el módulo de rigidez transversal del relleno.

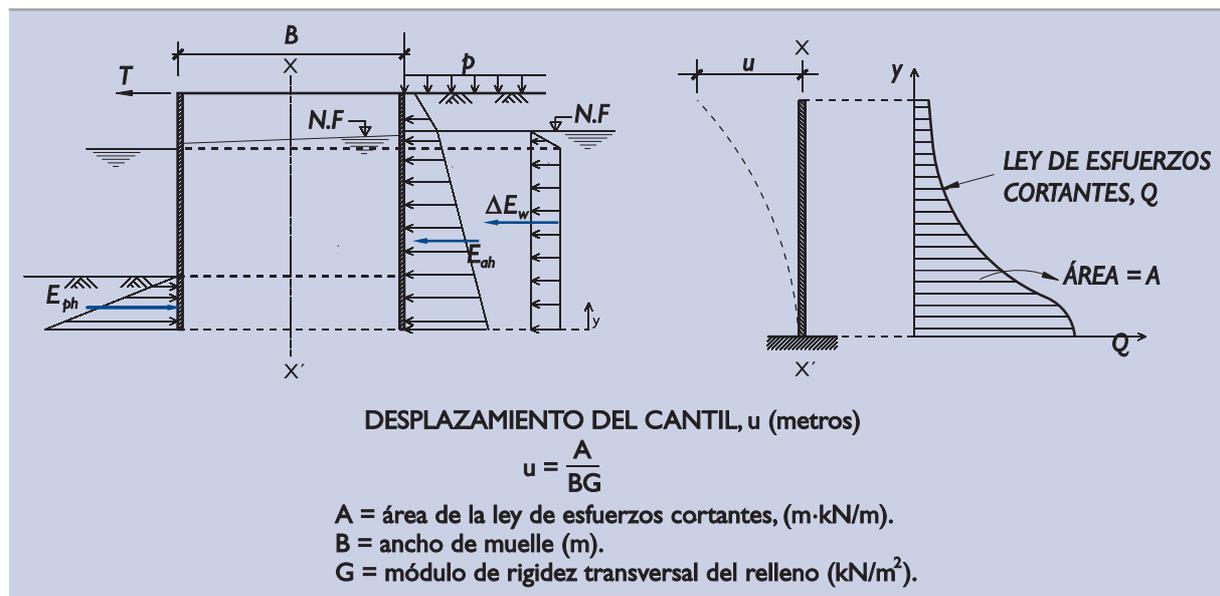
El efecto de las paredes de las celdas en la reducción de deformación puede tenerse en cuenta aumentando el producto B · G en la parte correspondiente a la contribución de las tablestacas.

La integración de esta ley permitiría calcular el desplazamiento horizontal del muelle a cualquier altura.

$$u(y) = \int_0^y \frac{Q}{B \cdot G} \cdot dz$$

En la Fig. 4.5.16 se indica esquemáticamente este procedimiento de cálculo, señalando la solución en el caso de que se suponga un módulo de rigidez transversal “G” constante en toda la altura.

Figura 4.5.16. Esquema del cálculo simplificado de deformaciones



El movimiento horizontal del cantil, dividido por la altura total del recinto, puede suponer una fracción variable entre menos del 1%, para muelles de pequeño calado y rellenos de celdas bien rígidos, y varias veces esa cantidad, en muelles de gran altura y rellenos de peor calidad.

Como se ha dicho, estas deformaciones han de añadirse a las que puedan deberse al propio cemento, considerando para el cálculo de estas últimas que el muelle se moviera como un bloque rígido.

Si el resultado de ambas deformaciones condujese a desplazamientos del cantil inferiores al 1% de la altura, es recomendable aumentar el empuje de cálculo (únicamente a efecto del cálculo de movimientos) y en lugar de suponer que el empuje es activo, suponerlo más próximo al empuje al reposo, tal como se recomienda en el apartado 4.2.4.

4.5.6 Otras recomendaciones

Desde el punto de vista geotécnico y sin ánimo de agotar las posibles Recomendaciones que en el futuro se incluyan en este Programa ROM, se avanzan algunas ideas complementarias a las ya indicadas en los apartados precedentes.

Preparación del cimiento

La estabilidad de los muelles de recintos tablestacados está encomendada, principalmente, a la resistencia del terreno en la zona de cimentación. Por ese motivo la preparación del cimiento debe definirse con gran precisión a la hora de proyecto y ser ejecutada con las máximas precauciones.

En los cimientos rocosos se debe limpiar, en el interior de los recintos, todo resto de material arcilloso que pudiera restar resistencia al contacto.

En los cimientos en suelos menos firmes, puede ser interesante sustituir o mejorar la zona más superficial y que tenga menor resistencia.

El dragado del interior de los recintos, cuando sea necesario, puede requerir estructuras de apeo temporal importantes.

El relleno de la celda puede provocar aumentos de presión intersticial transitorios, no sólo dentro de la celda, sino también en el cimiento. Su consideración es de la mayor importancia a la hora de proyecto.

Relleno de las celdas

El relleno óptimo de las celdas se consigue con materiales granulares de tamaño máximo no muy grande (unos 30 cm, a lo sumo) que estén formados por minerales no alterables, resistentes y, sobre todo, que sean suficientemente permeables. No se recomienda utilizar rellenos cuyos contenidos en finos (tamiz 0,080 UNE) sea superior al 5% del peso del material cuyo tamaño es inferior a 1" (una pulgada).

En caso de ser necesario utilizar otro tipo de relleno de menor calidad o dejar parte del terreno natural dentro del recinto, se considerará, en el proyecto, la posible generación y posterior disipación de presiones intersticiales transitorias dentro de los recintos. Puede ser conveniente disponer procedimientos que aceleren el proceso de consolidación.

En zonas sísmicas, y en recintos que se piensen realizar con arenas finas, se estudiará el riesgo de licuefacción de las celdas. Si tal riesgo existiera se adoptarán las medidas precautorias necesarias (compactación mediante vibroflotación a medida que se construye el relleno, por ejemplo).

Asientos del muelle

Los muelles de recintos de tablestacas pueden resultar deformables de manera que afecten a las instalaciones próximas.

Las deformaciones deben estimarse de manera que se puedan tomar medidas razonables para paliar los efectos de los movimientos postconstructivos.

Observación

La observación de los muelles de recintos tablestacados es de especial interés, dada la compleja interacción suelo-acero que controla su comportamiento.

Se recomienda que, en los proyectos de muelles de esta tipología, se disponga el sistema de auscultación necesario para medir:

- ◆ Movimientos del muelle. Se puede realizar mediante controles topográficos sencillos.
- ◆ Presiones intersticiales en el relleno y en el cimientado. Se puede realizar con piezómetros de cuerda vibrante instalados en las localizaciones de mayor interés.
- ◆ Tensiones de las tablestacas. Se pueden medir con strain-gauges adecuados.
- ◆ Cambios de diámetro. Pueden medirse con extensómetros horizontales de gran base.

Los procedimientos de medición de empujes totales, basados en células de presión, aunque son un objeto claro de la auscultación, no están aún suficientemente bien desarrollados. Eso no excluye que se realicen intentos de medición de empujes de tierras y agua sobre distintos puntos de las paredes del muelle. Su interpretación posterior debe realizarse con prudencia.

En acuerdo con el plan de observación que se decida en un determinado muelle, deben existir unos cálculos previos que indiquen los valores razonables que debe leer cada equipo de instrumentación. No debe procederse a implantar un sistema de auscultación, sin antes haber pronosticado, aunque sea de forma aproximada, el resultado que debe obtenerse para cada variable controlada.

4.6 DIQUES SECOS Y ESCLUSAS

La industria naval requiere la construcción de grandes recintos que puedan quedar en seco, próximos a la costa, donde reparar o construir los buques. Estas obras implican generalmente grandes volúmenes de movimientos de tierras, operaciones de achique muy importantes, así como la construcción de estructuras de contención de tierras de grandes alturas y soleras donde descansen los barcos y que, por lo tanto, soporten cargas elevadas.

Los problemas asociados a la construcción de diques secos están muy ligados a la geotecnia. Su solución suele estar controlada por la resistencia, la deformabilidad y, principalmente, la permeabilidad del terreno.

Las esclusas de navegación son estructuras similares que no necesitan quedar en seco, aunque sí soportan desniveles de agua importantes debidos a las oscilaciones del nivel de agua que requiere su funcionamiento.

Las esclusas de navegación pueden no tener solera (fondos rocosos) y necesitan dos o más puertas para permitir el tráfico naval. En estos aspectos, de entre otros, se diferencian de los diques secos.

4.6.1 Clasificación

El problema dominante en el proyecto de diques secos (en menor medida en las esclusas) es el efecto de la subpresión. Según la forma de resolver este tema, los diques secos pueden clasificarse en tres tipos diferentes.

- ◆ de gravedad.
- ◆ de solera drenada.
- ◆ de solera anclada.

Evidentemente pueden existir tipologías mixtas en las que la subpresión se soporte principalmente por gravedad con ayuda de alguna capacidad de anclaje o con alguna ayuda de drenaje.

Estas obras suelen construirse en excavaciones realizadas en seco, al amparo de ataguías y sistemas de achique temporales, pero también pueden construirse sin agotamiento en zonas previamente dragadas. En este segundo caso, además, la construcción puede realizarse con hormigones sumergidos o con elementos prefabricados.

En general la excavación y construcción en seco es preferible, y debe ser considerada siempre como solución a estudiar.

Los elementos más característicos de los diques secos se indican esquemáticamente en la Fig. 4.6.1. Además de los elementos que ahí se incluyen, deben mencionarse las instalaciones de bombeo para llenado y vaciado del dique, que suelen requerir excavaciones localizadas importantes, y la puerta del dique seco, que transmite a la estructura (muros y solera) los empujes del agua cuando el dique se vacía. Esto provoca en su contorno esfuerzos importantes.

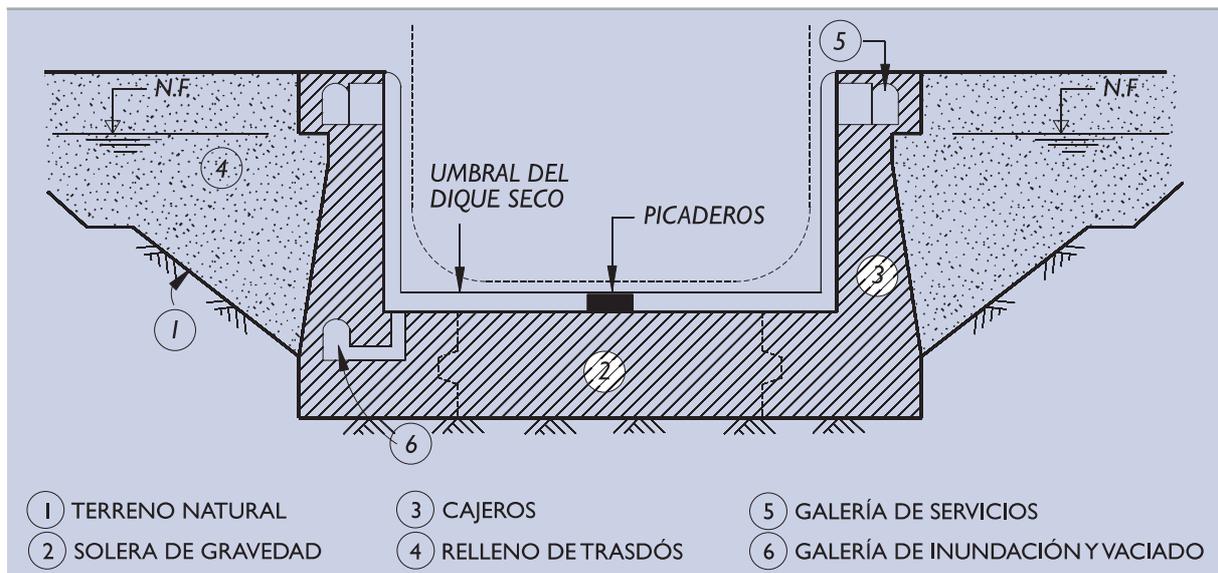
Junto a los diques secos existen cimentaciones importantes para las grúas que se necesitan para reparar o construir barcos. Algunas de esas cimentaciones pueden apoyarse en la estructura del dique seco o en sus proximidades, de manera que condicionen su proyecto.

4.6.2 Reconocimiento geotécnico

El reconocimiento geotécnico de un dique seco debe ser más detallado que el de otras obras portuarias de similar envergadura. Las repercusiones que pueden derivarse de un defecto de la investigación geotécnica, en este tipo de obras, es en general más importante que en otras de coste total equiparable.

El aspecto dominante del proyecto de dique seco es la forma de resolver el asunto de las subpresiones en la solera. Si en el momento de la planificación del reconocimiento geotécnico aún no está decidida la tipología del dique, deberán realizarse los reconocimientos geotécnicos teniendo en cuenta las tres posibles soluciones mencionadas en el apartado anterior.

Figura 4.6.1. Elementos típicos de un dique seco



Para estudiar las posibilidades de drenar la solera permanentemente y para estudiar la posibilidad de realizar la obra en seco, cualquiera que sea su tipología, se debe realizar un estudio hidrogeológico, con perspectivas de varios kilómetros alrededor de la obra, para establecer con seguridad el régimen de movimientos del agua en el entorno del dique seco.

La proximidad al mar acentúa aún más la importancia de las filtraciones respecto a otras excavaciones similares que pudieran hacerse tierra adentro.

Para realizar los estudios hidrogeológicos y geotécnicos, serán necesarios ensayos de bombeo que permitan cuantificar los caudales de achique.

Las búsquedas de cavidades cársticas (o microcársticas), o de diaclasas en roca o de singularidades que puedan aportar agua al cimiento con gradientes bajos, deben ser también objeto de estas investigaciones, particularmente en diques secos de solera drenada.

Para analizar los aspectos de estabilidad y deformaciones, será necesario realizar un reconocimiento geotécnico a lo largo de los cajeros laterales así como en la zona de solera y en el cierre de proa. Debe considerarse también la zona del umbral de entrada, donde se apoya la puerta, y la zona de ubicación de la central de bombeo, ya que en esas situaciones localizadas puede ser necesario hacer una construcción singular.

En la Parte 2 de esta ROM se exponen los criterios generales que deben guiar los reconocimientos geotécnicos. Además, en este tipo de obras, se deben considerar los siguientes aspectos complementarios:

- ◆ El estudio de los caudales de agotamiento necesarios durante construcción y en servicio requerirá realizar estudios detallados de sensibilidad. Los reconocimientos geotécnicos deben permitir una acotación realista de las posibles variaciones de los parámetros que controlan este problema.
- ◆ La excavación del dique seco, o de la esclusa, provocará en el terreno subyacente una decompresión importante. El reconocimiento del terreno debe incluir el estudio de los parámetros que controlan el entumecimiento, particularmente si los fondos son margosos o arcillosos (arcillas sobreconsolidadas que puedan presentar entumecimientos o hinchamientos importantes).
- ◆ En este tipo de obras, puede ser necesario realizar estudios de tratamiento del terreno para aumentar su resistencia o, más frecuentemente, para modificar su permeabilidad.
- ◆ La posibilidad de excavar (mecánicamente o con voladuras) o de dragar, debe ser también investigada en los reconocimientos geotécnicos.
- ◆ La profundidad de los reconocimientos debe ser suficientemente amplia para cubrir, no sólo los aspectos hidrogeológicos, sino también para evaluar la capacidad resistente de eventuales cimentaciones profundas o ancladas.
- ◆ El trasdosado de los muros, los posibles rellenos estructurales (soluciones prefabricadas fondeadas sobre banquetas) y la necesidad de áridos para hormigones obligará a un estudio específico de procedencia y calidad de los materiales de préstamo.

En la Fig. 4.6.2 se indican esquemáticamente algunos de los temas asociados al estudio de los diques secos.

4.6.3 Diques secos de gravedad

La solución más utilizada, sobre todo en diques secos de poca anchura, es la tipología de gravedad. El peso de la solera y de los cajeros (unidos a ella), más las tierras que puedan colaborar en el peso de los cajeros, debe impedir que el dique flote al vaciarlo.

Los problemas más comunes de esta tipología y que están controlados por las características del terreno son los que se comentan a continuación, indicando, en cada uno de ellos, algunas recomendaciones generales. Dado que cada proyecto tendrá sus propias singularidades, el ingeniero estará obligado a desvelar cada posible problema y darle el oportuno tratamiento.

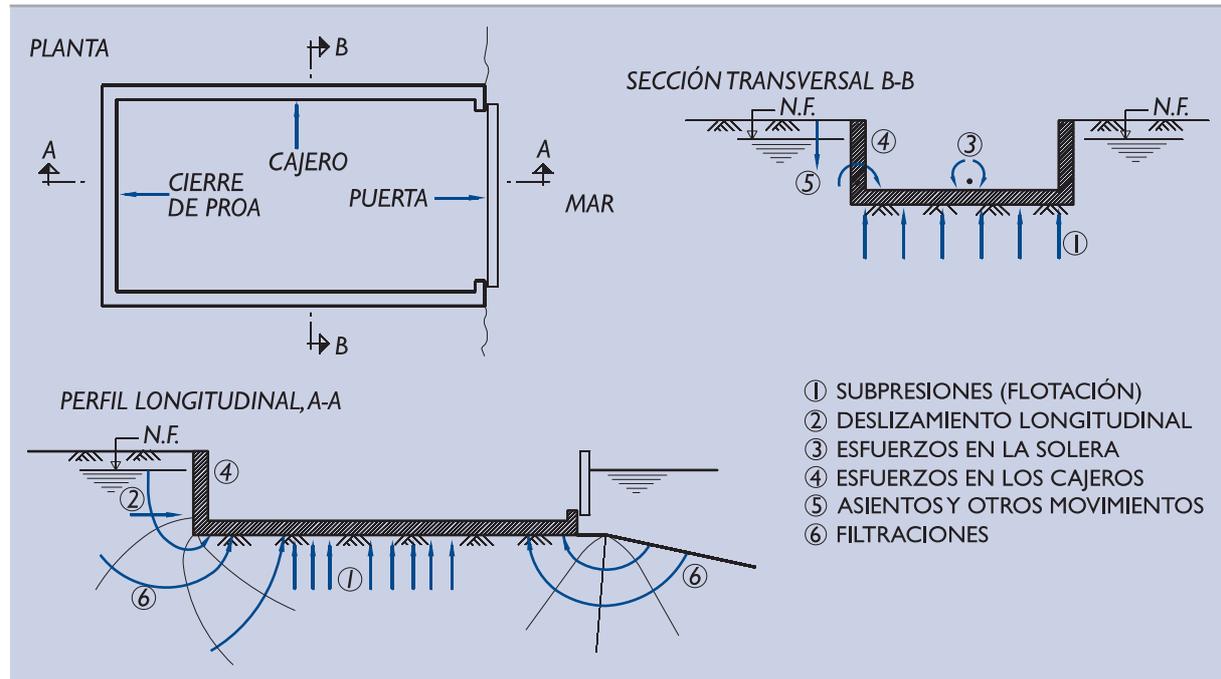
4.6.3.1 Verificación de la seguridad frente al levantamiento del dique debido a las subpresiones

En las soleras de gravedad, se deberá suponer que sobre toda la cara inferior actúa la subpresión máxima, sin reducción alguna. Para el cálculo del peso del dique, se contabilizará, además del peso de la solera, el de los muros cajeros y de las tierras que puedan moverse con ellos.

En los diques secos de gran anchura, la solera puede estar separada estructuralmente de los cajeros para evitar las grandes flexiones que podrían aparecer como consecuencia de la subpresión. En esos casos, únicamente el peso de la solera debe soportar la subpresión completa.

En próximos documentos del Programa ROM se indicarán detalles específicos del cálculo de la seguridad frente al levantamiento del dique debido a la subpresión.

Figura 4.6.2. Temas asociados al estudio de diques secos



Provisionalmente se recomienda que la seguridad frente a la flotación sea analizada como un Estado Límite Último de tipo UPL que se define en 3.3.1, considerando los coeficientes parciales para las combinaciones de acciones fundamentales que se indican en 3.3.6. El coeficiente de seguridad puede definirse como el cociente entre la fuerza necesaria para levantar el dique, con las tierras que estén unidas solidariamente con él, y la fuerza máxima que puede provocar la subpresión.

Este coeficiente de seguridad para obras de ISA bajo (5 a 19) debe ser:

$F_1 \geq 1,3$ para combinaciones cuasi-permanentes.

$F_2 \geq 1,2$ para combinaciones fundamentales.

$F_3 \geq 1,1$ para combinaciones accidentales y sísmicas.

Además, se tendrá en cuenta lo especificado en 3.3.8 y 3.3.10 a los efectos de aumento o reducción de los coeficientes de seguridad recomendados, atendiendo a otros caracteres de la obra y a la duración de la situación de proyecto.

4.6.3.2 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento longitudinal

En los diques de solera de gravedad, la subpresión es tan importante que la compresión efectiva de la solera contra el terreno queda notablemente reducida.

En la situación normal de explotación, con el dique vacío, es posible que las acciones horizontales, relativamente moderadas, puedan provocar el deslizamiento longitudinal del dique. El empuje de tierras en el cierre de proa, por ejemplo, puede ser causa de deslizamiento longitudinal en algunas disposiciones concretas.

El problema debe ser analizado por el ingeniero de manera que la seguridad frente a este posible deslizamiento sea suficientemente amplia; similar a la que se recomienda para este tipo de roturas en otras partes de esta ROM (apartado 3.5).

4.6.3.3 Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera

Con el dique vacío, la solera está sometida al esfuerzo de flexión necesario para transmitir la carga de la subpresión hacia los cajeros laterales. El peso del barco, transmitido a través de los picaderos, generará esfuerzos localizados que pueden ser importantes.

En general las soleras de gravedad son de espesor suficiente, de manera que no necesiten armaduras importantes, aunque este aspecto depende, lógicamente, de la anchura del dique seco.

El estudio de los esfuerzos en la solera será, en general, un problema condicionado por la deformabilidad del suelo y, por eso, será recomendable realizar un cálculo de interacción suelo-estructura. En esos cálculos el terreno puede quedar representado por simples muelles. En el apartado 3.5.7 se indica un procedimiento adecuado para evaluar constantes de resorte que representen la deformabilidad del terreno.

En obras de importancia, se recomienda realizar un cálculo más preciso (como el método de elementos finitos en elasticidad lineal, por ejemplo).

4.6.3.4 Verificación de la seguridad de los muros cajeros

Los muros cajeros de los diques secos de gravedad pueden ser de varias tipologías; generalmente serán de hormigón, ya sean de gravedad, de contrafuertes o simples pantallas.

El estudio de los cajeros deberá realizarse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.7 dedicado a empujes de tierras y estructuras de contención.

El estudio de la estabilidad al deslizamiento de estos muros no suele ser necesario ya que este mecanismo de rotura estará impedido por la solera. El estudio de la seguridad al hundimiento (y al vuelco que, según se indica en el apartado 3.5.6, es un mecanismo de rotura asociado) no suele ser necesario comprobarlo, siempre que la unión de la solera impida el movimiento de los cajeros.

Las condiciones de estabilidad durante las Fases de Construcción pueden ser más críticas que en Servicio y deben considerarse expresamente en el proyecto.

4.6.3.5 Movimientos

Los movimientos del dique seco pueden ser importantes y afectar a las estructuras próximas o a las que apoyen sobre él.

El vaciado del dique puede provocar un ascenso de la solera y de los cajeros, lo que se traduciría en un asiento diferencial de posibles estructuras próximas.

El vaciado puede provocar, además, cierta filtración del agua del entorno del dique hacia el interior; bien sea a través de los muros o de la solera, y ello puede conducir a asientos adicionales.

El ingeniero deberá hacer una estimación de los movimientos del dique. El modelo estructural utilizado en el estudio de esfuerzos puede ser de ayuda en estos cálculos.

4.6.3.6 Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones

Los diques secos de solera drenada pueden tener filtraciones a través de sus cajeros y de su solera, cuando están vacíos.

Los achiques necesarios para mantener en seco el dique serán pequeños ya que las filtraciones se producirán únicamente a través de ciertas zonas localizadas (juntas, principalmente).

Las filtraciones, aunque sean moderadas, pueden provocar arrastres de suelos finos, tanto de los materiales del relleno del trasdós como del propio terreno natural.

El ingeniero examinará esta cuestión y adoptará las medidas preventivas oportunas (filtros en las zonas de juntas, reforzamiento de las bandas de estanqueidad, tratamiento de impermeabilización local del terreno, etc.).

4.6.4 Diques secos de solera drenada

En los diques secos de gran anchura, el coste de las soleras necesarias para resistir la subpresión puede ser tan alto que interese estudiar la alternativa de drenarlas permanentemente.

En la Fig. 4.6.3 se indican, esquemáticamente, algunos elementos de este tipo de solución.

4.6.4.1 Reducción de subpresiones. Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones

El elemento esencial de esas soluciones es el sistema de impermeabilización y drenaje.

La impermeabilidad del terreno puede mejorarse construyendo pantallas profundas que rodeen la solera, ya sean de hormigón, de tablestacas metálicas, de bentonita-cemento o formadas por inyecciones de lechada de cemento o de otro tipo.

Tras las barreras de impermeabilización que pudieran disponerse, se debe establecer un sistema de drenaje que reduzca la subpresión en la solera.

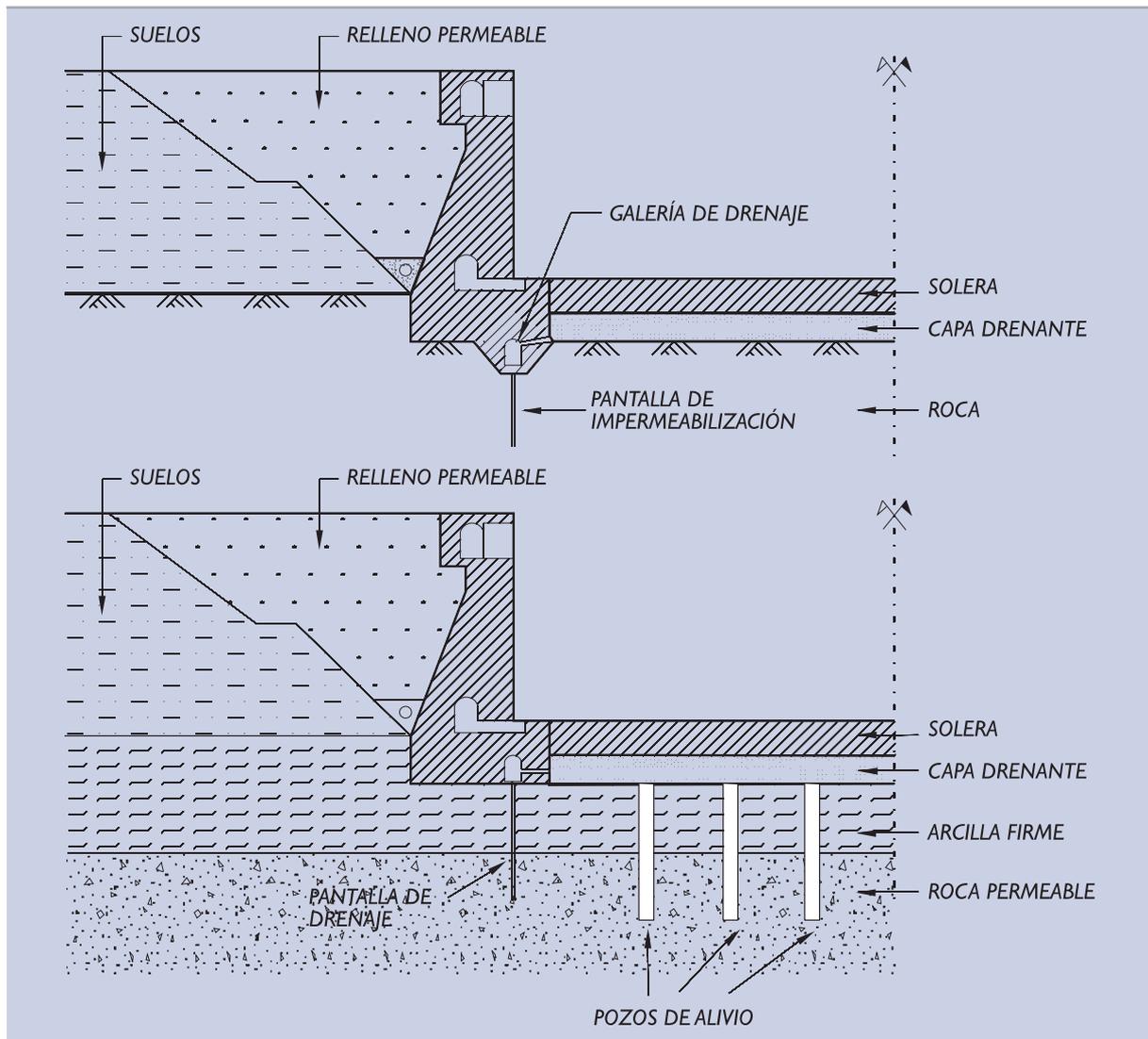
El sistema de drenaje constará, en general, de unos elementos de captación de filtraciones y de unos elementos de conducción y bombeo de las mismas.

La captación de las filtraciones debe hacerse siempre en la base de la solera, mediante una capa drenante bien estudiada de manera que las filtraciones no produzcan arrastres ni erosiones. En el apartado 3.4.8 se indican algunos criterios recomendables a este respecto.

La captación puede realizarse también mediante pozos auxiliares tales como los que se indican en la Fig. 4.6.3. Estos pozos, situados después (en el sentido de la corriente de filtración) del sistema de impermeabilización que pudiera existir, pueden construirse bajo los cajeros o bajo la propia solera.

La circulación de agua hacia el sistema de drenaje debe mantenerse bajo ciertos límites, no sólo para reducir los costes de explotación, sino también para evitar posibles arrastres (en suspensión o en disolución) de las aguas que se bombean. En cualquier caso, la protección frente a arrastres debe estudiarse y resolverse con el proyecto de los filtros adecuados.

Figura 4.6.3. Posibles esquemas de soleras drenadas



El estudio del drenaje de la solera debe hacerse con amplitud suficiente, considerando, no sólo el terreno en las proximidades de la solera, sino también el estado de subpresiones que pueden ocurrir a profundidades mayores. La presencia de un estrato impermeable a cierta profundidad bajo la solera puede provocar un levantamiento del fondo aunque las subpresiones en el contacto solera-terreno sean nulas.

En cualquier caso, las soleras drenadas deben disponer de válvulas de seguridad, de manera que un fallo en el sistema de reducción de las subpresiones (impermeabilización, drenaje, conducción-bombeo) no implique el levantamiento de la solera y la consiguiente ruina de la obra.

4.6.4.2 Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera

Las soleras drenadas pueden estar rígidamente unidas a los muros cajeros o separadas de ellos mediante juntas estructurales estancas.

El análisis estructural de los esfuerzos será un problema de interacción suelo-estructura que debe resolverse como se indica en 4.6.3.3.

4.6.4.3 Verificación de la seguridad de los muros cajeros

El estudio de los cajeros debe realizarse siguiendo las recomendaciones del apartado 3.7 de esta ROM dedicado a las estructuras de contención de empujes de tierras.

Las soleras drenadas, aunque de espesor reducido, suelen tener capacidad estructural suficiente para impedir el deslizamiento de los muros cajeros. Este extremo debe ser comprobado en cada caso particular.

El hundimiento y el vuelco de los muros cajeros, particularmente en aquellos casos en los que la solera está separada estructuralmente de los cajeros mediante juntas, debe ser analizado contando con la solera como sobrecarga no resistente.

El problema de equilibrio global de los cajeros puede ser crítico, habida cuenta de la presencia de una red de filtración artificial generada por el sistema de achique y las sobrecargas que puedan existir en los alrededores del dique.

4.6.4.4 Movimientos

Los movimientos de la solera del dique pueden ser importantes en suelos blandos debido a las variaciones de carga entre las situaciones de dique lleno y dique vacío.

El achique permanente de las filtraciones bajo la solera puede provocar subsidencias (asientos que afecten a áreas extensas) en el entorno, que el ingeniero debe evaluar a la hora de proyecto.

El movimiento de los cajeros puede analizarse como se indica en esta ROM para las distintas tipologías de estructuras de contención (apartado 3.7).

4.6.5 Diques de solera anclada

La subpresión, en la solera de los diques secos, puede soportarse con elementos a tracción unidos rígidamente a la solera y al terreno.

Estos elementos de tracción pueden ser de hormigón (pilotes a tracción) o metálicos. En general no se recomienda utilizar elementos metálicos sometidos a grandes tensiones (cables o tendones de acero de alta resistencia) salvo que se tomen precauciones especiales para evitar el problema de la fragilidad inducida por el hidrógeno atómico libre.

La utilización de pilotes puede ser conveniente para ayudar a transmitir cargas de compresión concentradas bajo los picaderos de apoyo.

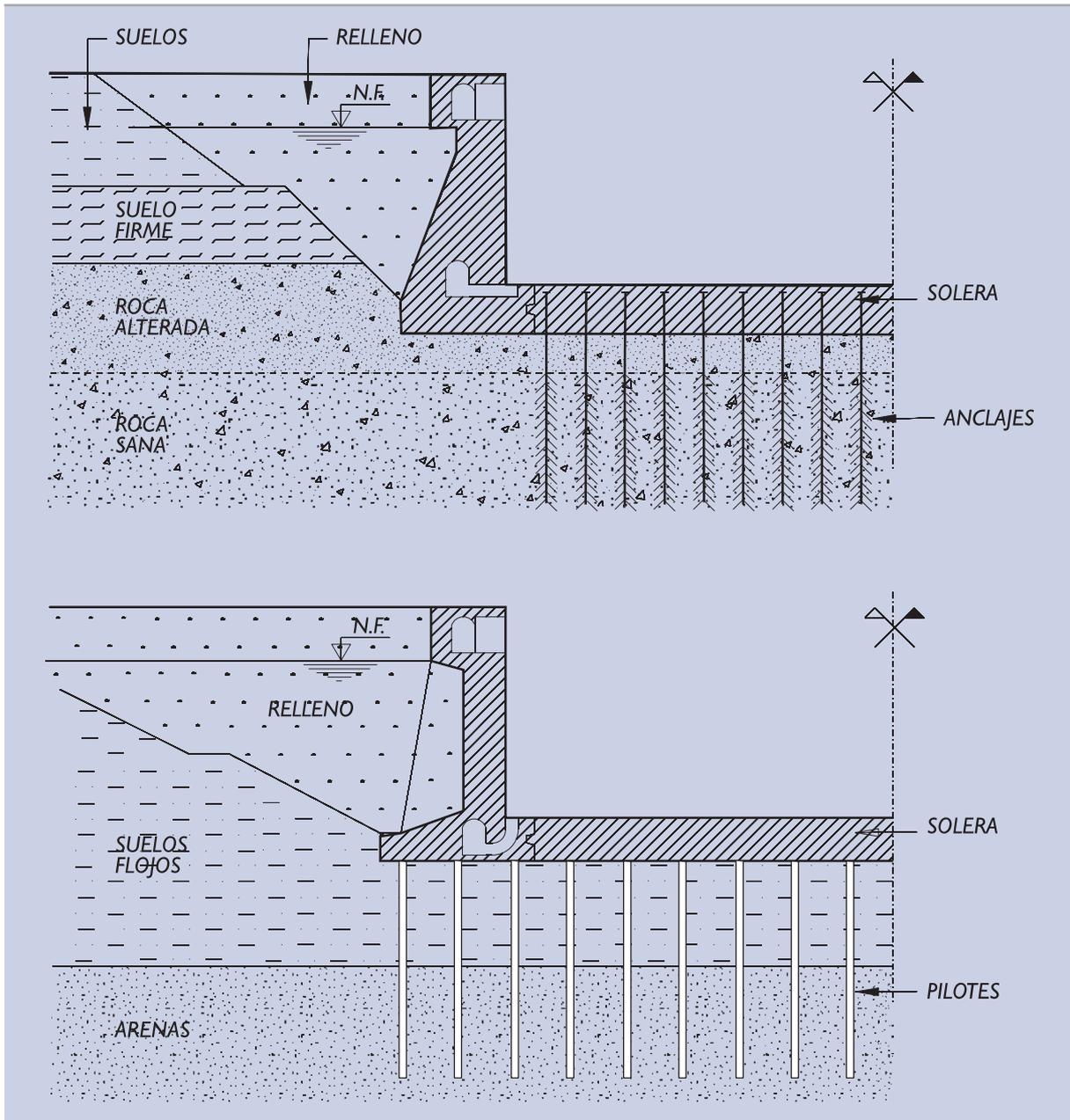
La Fig. 4.6.4 indica esquemáticamente algunos aspectos de esta solución de solera anclada o pilotada.

4.6.5.1 Verificación de la seguridad frente al levantamiento de la solera

Cada anclaje de la solera debe ser capaz de soportar la subpresión correspondiente a su área de afección. La longitud de anclaje debe ser suficiente, de manera que la seguridad al arranque sea superior a la que se indica en 3.6.7.

El levantamiento de la solera y sus anclajes, en grupo, debe evitarse disponiendo el anclaje hasta una profundidad tal que el peso del terreno involucrado sea suficiente para evitar ese levantamiento masivo (efecto grupo indicado en 3.6.7).

Figura 4.6.4. Posibles esquemas de soleras ancladas



Es recomendable que, después de construirlos, se pruebe uno a uno cada elemento de tracción, sometiendo a la carga de servicio. Ensayos hasta rotura, en algunos elementos adicionales contruidos al efecto, son también recomendables.

4.6.5.2 Verificación de la seguridad frente al agotamiento estructural de la solera

Los esfuerzos en la solera pueden estudiarse tal como se indica en 4.6.4.2 añadiendo al modelo de cálculo unos muelles adicionales que representen a los anclajes o pilotes.

Las constantes de resorte que representen a los pilotes pueden estimarse según se indica en 3.6.9.

4.6.5.3 Verificación de la seguridad de los muros cajeros

Las soleras drenadas y las ancladas suelen ser de espesores similares, ya que el espesor está condicionado, principalmente, por las cargas de uso y explotación. Por ese motivo, el estudio de los cajeros, en los términos generales que aquí se consideran, debe hacerse como se indica en 4.6.4.3.

4.6.5.4 Movimientos

El movimiento de las soleras ancladas en roca será, en general, moderado y no será un problema crítico. Las soleras pilotadas a través de suelos blandos pueden tener ciertos movimientos. El ingeniero debe estimarlos siguiendo las recomendaciones indicadas en 3.6.9.

Los movimientos de los cajeros deben analizarse tal como se indica en 3.5.7, si están cimentados superficialmente, o como se indica en 3.6.9 si se apoyan sobre pilotes.

4.6.5.5 Verificación de la seguridad frente a los efectos de las filtraciones

Las consideraciones hechas en el apartado 4.6.3.6, relativas a las soleras de gravedad, son aplicables a este caso.

4.6.6 Esclusas de navegación

La subpresión es un problema de menor trascendencia en las esclusas que en los diques secos, de manera que las soleras suelen ser de gravedad o incluso, en buenos terrenos, pueden no existir. En cualquier caso, la misión de la solera es importante como soporte de los cajeros contra el problema de deslizamiento.

4.6.7 Estudio de la construcción

El proyecto de un dique seco, o de una esclusa de navegación, está estrechamente ligado al proceso constructivo.

La forma de hacer las excavaciones y los achiques temporales o los trabajos de dragado o relleno para el fondeo de posibles soluciones prefabricadas, la forma de hacer los rellenos posteriores, etc., son aspectos primordiales del proyecto.

El ingeniero debe pensar en posibles situaciones críticas durante la Fase de Construcción, tales como posibles inestabilidades de los taludes de excavación, arrastres debidos al achique temporal, estabilidad provisional de los cajeros, etc.

Esas posibles situaciones críticas serán específicas de cada obra y de cada procedimiento constructivo y deberán ser oportunamente identificadas y evaluadas. Los coeficientes de seguridad que se obtengan deberán ser suficientemente holgados y, en cualquier caso, superiores a los que se indican en esta ROM, para cada modo de fallo que el ingeniero pueda prever y considerando la construcción como si se tratara de una situación transitoria.

4.7 DIQUES DE ABRIGO

En próximos documentos del Programa ROM y en especial en la ROM I.1, se incluirán métodos específicos y completos para el proyecto y construcción de diques de abrigo. Este apartado de la presente ROM, dedicada a los factores y modos de fallo geotécnicos, pretende únicamente señalar los principales problemas geotécnicos

que afectan a este tipo de obras, así como algunas metodologías simplificadas para poder abordarlos en ausencia de métodos más precisos o detallados.

Los diques son estructuras que tienen como función principal la de proporcionar áreas abrigadas, tanto portuarias como litorales, a resguardo de las acciones de las dinámicas marina y atmosférica. Por lo general, un área portuaria abrigada se proyecta para facilitar las operaciones portuarias y logísticas relacionadas con el transporte marítimo. Por otra parte, un área litoral abrigada se proyecta para facilitar el uso y explotación ordenada y sostenible del entorno litoral, pudiendo incluir, entre otros, la corrección, conservación y regeneración de playas y zonas de baño y el intercambio de los flujos transversales tierra-mar de sustancias naturales y artificiales.

4.7.1 Tipos de diques

Los diques de abrigo pueden diferenciarse en las siguientes tipologías:

- ◆ Dique en talud emergido.
- ◆ Dique vertical.
- ◆ Dique mixto.
- ◆ Dique rebasable y sumergido.
- ◆ Dique berma.

Se diferencian entre ellas, principalmente, por las dimensiones de cada una de las partes (cimentación, cuerpo central y superestructura) y, consecuentemente, por su forma de controlar los agentes climáticos y de transmitir los esfuerzos al terreno.

La sección tipo de un dique en talud emergido consta de una secuencia de mantos que conforman una transición entre el núcleo de todo-uno de cantera y el manto principal, elemento granular construido mediante escolleras o piezas artificiales de hormigón. En algunos casos se incorporan bermas de pie para asegurar la estabilidad y forma del talud exterior; proteger la cimentación y proporcionar apoyo a los mantos secundarios. En la mayor parte de los casos la estructura se completa con un espaldón.

En la Fig. 4.7.1 se indica una sección típica de un dique en talud emergido, señalando algunos de los elementos de mayor interés.

La característica principal de la sección tipo de un dique vertical es que la parte central y la superestructura están formados por un único elemento estructural. Generalmente el paramento del lado mar es vertical y se puede construir mediante cajones prefabricados, bloques de hormigón en masa, pantallas de tablestacas, recintos, etc. Se apoya generalmente sobre una banquetta de todo-uno de cantera enrasada a una profundidad tal que se pueda fondear y protegida o no por un manto exterior en función de que su estabilidad esté o no afectada por las oscilaciones del mar. En muchas ocasiones se construye sobre la banquetta y adosado al cuerpo central del dique un bloque de grandes proporciones, denominado de guarda, con la finalidad de reducir el pico de las subpresiones en el borde del lado de mar de la cimentación y proteger contra la socavación.

En la Fig. 4.7.2 se indica una sección tipo de un dique cuyo paramento vertical estaría formado por un cajón prefabricado de hormigón armado.

Cuando la banquetta de cimentación, definida en el caso de los diques verticales, ocupa una proporción notable de la profundidad de tal forma que su presencia modifica significativamente la cinemática y dinámica de las oscilaciones del mar, la tipología se denomina dique mixto. En estos casos, la función protectora se comparte entre el tramo inferior, ampliando su función de cimentación, y el tramo central proporcionando los servicios de una superestructura.

La sección tipo de los diques rebasables o sumergidos es muy similar a la del dique en talud emergido aunque sin espaldón, puesto que a partir de un núcleo de todo-uno de cantera se construye una secuencia de mantos hasta alcanzar el manto exterior; el cual se debe prolongar por la coronación y, dependiendo de su anchura, extenderse por el manto de sotamar. La cota de coronación delimita el comportamiento de la sección frente al rebase de las olas.

Figura 4.7.1. Dique en talud emergido

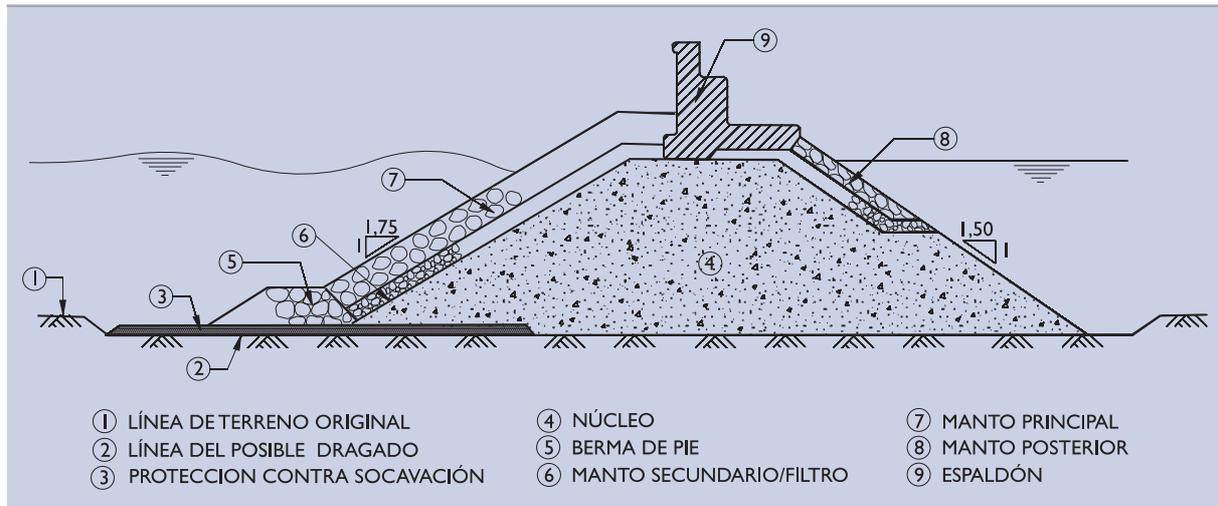
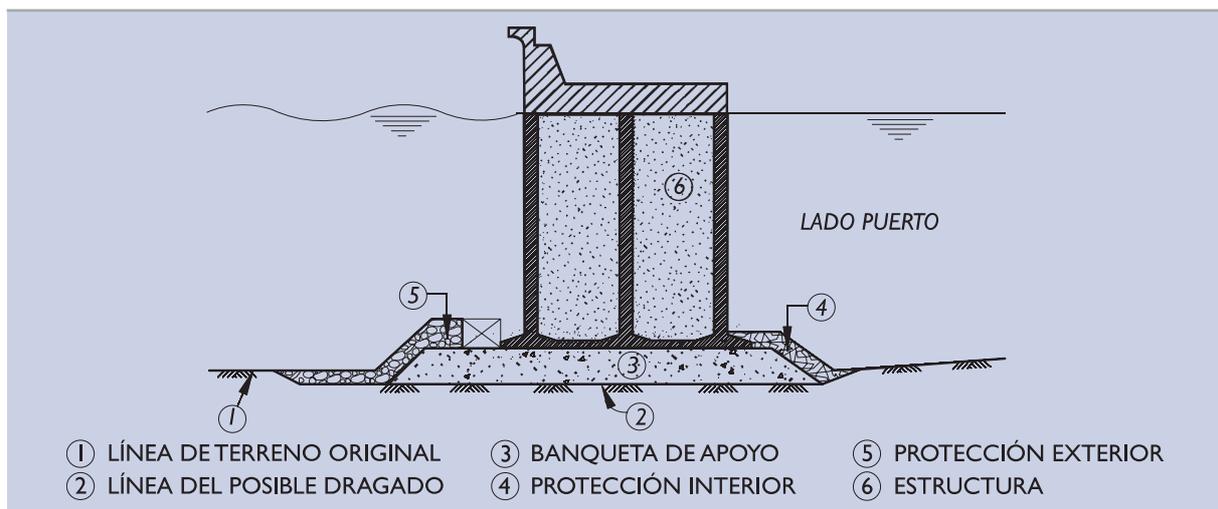


Figura 4.7.2. Dique vertical



Cualquier tipo de dique con sección en talud, vertical o mixta puede considerarse como rebasable en un estado de mar si el francobordo relativo (F_d/H_T) es menor o igual que 1,0. Siendo H_T la altura de ola más alta de dicho estado de mar a pie de dique, considerando el nivel alto del mar simultáneo y compatible con el estado de mar.

El dique berma se caracteriza porque el cuerpo central del dique es una continuación de la cimentación y está formado, generalmente, por materiales granulares con una granulometría no uniforme que en el ámbito marítimo se denominan rip-rap. La sección tipo se construye con un talud muy tendido con el objetivo de conseguir la estabilidad estática de la misma o bien con taludes más pendientes, admitiendo en los mismos deformaciones importantes en Fase de Servicio hasta alcanzar perfiles estables.

La elección de una u otra tipología debe hacerse en cada caso concreto atendiendo a varias razones tales como la naturaleza del terreno de cimentación, el calado, la amplitud de la zona portuaria, la disponibilidad de materiales, costes de construcción, mantenimiento y gran reparación, tiempo de construcción, posibilidades de mantenimiento, impacto ambiental etc.

Figura 4.7.3. Dique mixto

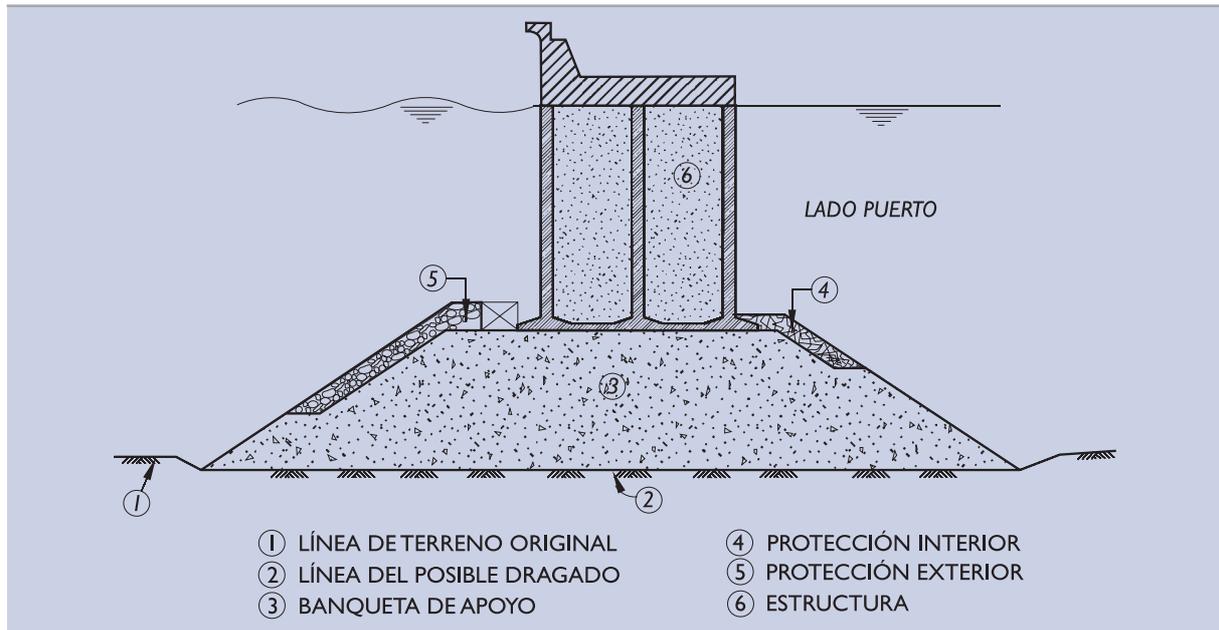


Figura 4.7.4. Dique rebasable y sumergido

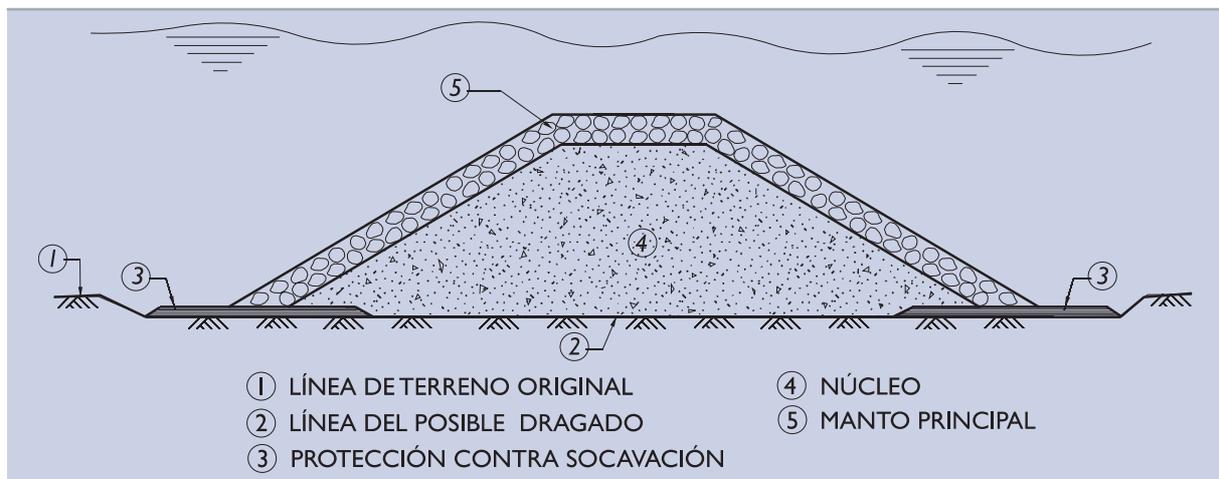
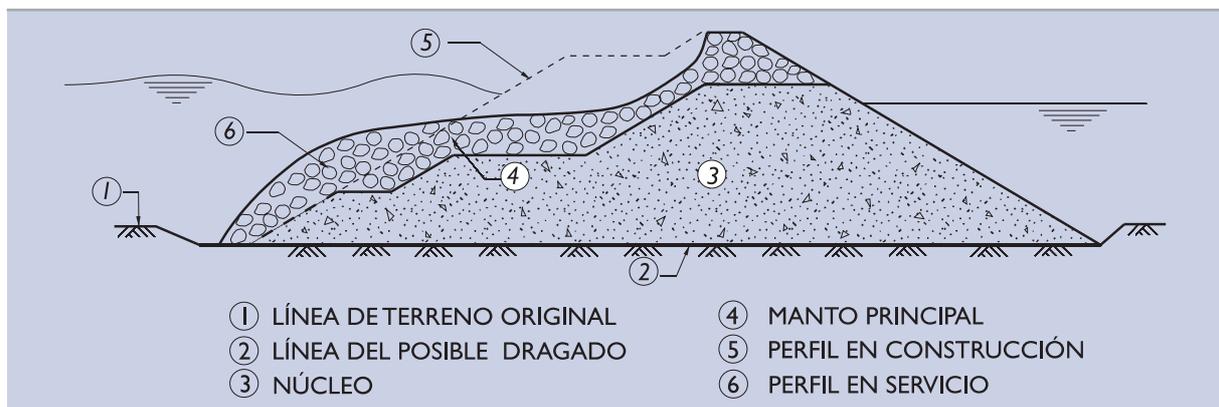


Figura 4.7.5. Dique berma



4.7.2 Información geotécnica

4.7.2.1 Reconocimiento del cimiento

El reconocimiento geotécnico de la zona de afección de los diques de abrigo está encaminado a estudiar los problemas geotécnicos asociados a este tipo de estructuras en presencia de las oscilaciones del mar que, como más adelante se indican, son, además de los comunes de la mecánica del suelo, los problemas asociados a la erosión, la existencia de flujos de agua en el medio poroso con la consiguiente generación de presiones intersticiales, al comportamiento dinámico del conjunto suelo-estructura.

A efectos de los estudios posteriores es preciso, por lo tanto, conocer, de cada tipo de suelo que exista en el entorno del dique, su naturaleza, su granulometría y correspondiente permeabilidad, su resistencia y su deformabilidad. De los fondos rocosos interesa conocer su naturaleza así como la estructura, el diaclasamiento y el grado de alteración de la roca y su variación con la profundidad.

En la Parte 2 de esta ROM se indican ciertas recomendaciones que el ingeniero debe seguir a la hora de planificar y ejecutar estos reconocimientos geotécnicos.

Las acciones debidas al oleaje, a otras oscilaciones del nivel del mar y al sismo son las principales cargas que actúan sobre los diques de abrigo capaces de producir efectos dinámicos significativos en el conjunto suelo-estructura, así como variar el comportamiento del suelo, tanto en lo que respecta a su capacidad resistente como a su comportamiento deformacional. Los fenómenos a que pueden dar lugar, como la densificación, la licuefacción y la generación de presiones intersticiales y de fuerzas hidrodinámicas de filtración en los suelos, deben ser oportunamente investigados. En el apartado 3.10 de esta ROM se indican recomendaciones que el ingeniero debe considerar a este respecto.

4.7.2.2 Estudio de materiales de préstamo

El estudio de los materiales de préstamo necesarios para construir los diques de abrigo es un aspecto esencial de este tipo de obras. Normalmente condiciona la selección de la tipología más conveniente. El estudio de los tamaños de piedra que puede producir una determinada cantera y el estudio de las características granulométricas (permeabilidad) y mecánicas (resistencia y deformabilidad) de los materiales de préstamo se necesita para analizar, después, el comportamiento del dique frente a las oscilaciones del mar.

a. Calidad de la roca

Es esencial que la roca explotada como cantera sea sana y durable. En caso de disponerse de rocas de baja calidad (resistencia a compresión simple inferior a 50 MPa, peso específico inferior a 26 kN/ m³, por ejemplo), su utilización debe restringirse al núcleo de los diques o, como mucho, a las capas intermedias. El manto de protección externa debe hacerse, en esos casos, con elementos de otro tipo.

La calidad de la roca puede examinarse mediante ensayos mineralógicos que determinen los componentes principales. Deben excluirse aquellas rocas con contenidos altos en minerales arcillosos (margas, por ejemplo), minerales expansivos (anhidritas y algunos sulfatos) o minerales solubles (yesos y otras sales).

La durabilidad puede determinarse indirectamente mediante ensayos de laboratorio como los indicados en la Parte 2 de esta ROM (apartado 2.11.9). En los documentos ROM 0.1 y ROM 1.1 se fijan los valores recomendados por los correspondientes parámetros para cada una de las partes del dique.

La calidad de la roca ha de examinarse, también, como posible préstamo para áridos de hormigones. En ese sentido pueden ser necesarios ensayos adicionales para comprobar su utilidad.

b. Resistencia al corte de las escolleras

La rotura de las escolleras es un problema complejo aún no bien resuelto. En la práctica habitual, su resistencia se representa en los cálculos mediante unos parámetros de cohesión y rozamiento, igual que se hace para los suelos granulares naturales.

Existen, sin embargo, algunas diferencias básicas entre los suelos granulares y las escolleras. Las escolleras pueden tener grandes bloques y granulometrías abiertas que no suelen darse en los suelos granulares naturales. Las aristas vivas que suelen existir en los contactos entre los fragmentos de las escolleras son, en los suelos granulares, más redondeados.

Las fuerzas intergranulares, para una misma presión efectiva, crecen con el cuadrado del diámetro medio de los fragmentos que forman las escolleras. Por este motivo, la rotura de los contactos entre granos, que no suele ocurrir en los suelos granulares de naturaleza silíceos hasta presiones muy elevadas (20 MPa por ejemplo), puede ocurrir, en escolleras de grandes bloques, para presiones moderadas y próximas a las de servicio en estos usos marítimos. El fenómeno de rotura de los contactos puede tener importancia para presiones en el entorno de 1 MPa ⁽⁵⁾.

Para tener estos efectos en consideración, la resistencia al corte de las escolleras se suele definir con un ángulo de rozamiento variable:

$$\phi = \phi_o + R \log_{10} \frac{\alpha \cdot q_u}{\sigma'_n} \leq 60^\circ$$

donde:

- ϕ_o = ángulo de rozamiento básico, que depende de la naturaleza de la roca. Suele estar comprendido entre 25 y 35°.
- R = disminución del ángulo de rozamiento al multiplicar por diez la compresión efectiva normal al plano de deslizamiento. Su valor depende principalmente de la forma de los cantos y del grado de compactación, pudiendo oscilar entre cero, para las escolleras finas poco angulosas, y más de 10°, para una escollera de granulometría muy abierta y aristas muy vivas.
- α = parámetro adimensional que depende del tamaño de los fragmentos. Puede oscilar entre 0,5 para escolleras de grandes bloques hasta cerca de la unidad para escolleras del tamaño de las gravas.
- q_u = resistencia a compresión simple de la roca. A estos efectos tal resistencia se puede determinar indirectamente, con el ensayo de carga puntual.
- σ'_n = compresión normal efectiva en el plano de corte.

Para las zonas más próximas a la superficie, cuando la compresión efectiva σ'_n es pequeña (menor que 1 kPa) se puede suponer, además de la resistencia por fricción, una pequeña cohesión de valor constante y del orden de 0,1 kPa. Con esto se evita el problema teórico de resistencia nula en superficie sin introducir errores apreciables en los cálculos de estabilidad.

Las escolleras de buena calidad pueden comportarse, como se ve, con ángulos de rozamiento muy altos en zonas próximas a la superficie, eso explica que taludes externos tan pronunciados como el 1,5 H:IV sean estables incluso en las severas condiciones que supone el oleaje ⁽⁶⁾.

En contra de este beneficio de la singularidad del comportamiento resistente de las escolleras, debe citarse un inconveniente de tipo práctico. Los ensayos en modelo físico, que tratan de representar el comportamiento hidrodinámico de las escolleras ante el oleaje, se realizan con niveles de tensiones más bajos que los reales. El comportamiento resistente podría resultar optimista. A su vez, estos modelos físicos tampoco reproducen correctamente el comportamiento mecánico de las escolleras al no esca-

(5) Un fenómeno similar ocurre en arenas calcáreas de origen orgánico, tal como se ha descrito en el apartado 2.2.8.1.

(6) Un análisis sencillo de estabilidad, según líneas de rotura planas paralelas al talud y con flujo de agua descendente, indicaría ángulos de rozamiento necesarios del orden de 60°.

larse estas propiedades en el modelo con el número de Froude. Por lo tanto, este comportamiento no puede validarse con este tipo de ensayos.

Teniendo presentes las consideraciones previas, el ingeniero debe investigar la resistencia de las escolleras. Hoy existen posibilidades en España de realizar ensayos de resistencia de escolleras con granulometrías y ambientes de presiones similares a los reales, que pueden ser de interés en proyectos de importancia.

Estos estudios, que pueden tener menos interés en los mantos de protección formados por escolleras de gran tamaño, pueden resultar muy adecuados para los mantos secundarios y para el núcleo del dique.

c. Permeabilidad de las escolleras

El flujo del agua, en el ambiente de presiones generadas en el entorno de los diques y con las granulometrías usuales de las escolleras, puede distar mucho del régimen laminar implícito en la ley de Darcy, cuya utilización se recomienda en esta ROM (ver apartado 2.2.6).

El movimiento del agua obedece a un proceso complejo de interacción entre el agua, con aire atrapado, y la escollera. El régimen del movimiento del agua, particularmente en la zona de contacto mar-escollera, es claramente turbulento ($Re = v \cdot D_{50}/\nu > 1000$).

A pesar de ello, y para facilitar los cálculos posteriores, se suele seguir hablando de coeficiente de permeabilidad de las escolleras en el mismo sentido utilizado en la mecánica de suelos, esto es, como cociente entre la velocidad de descarga (caudal dividido por superficie total bruta) y el gradiente del potencial del movimiento del agua. El ingeniero debe saber que, en estos casos de movimientos turbulentos del agua, el coeficiente de permeabilidad depende del gradiente (varía inversamente proporcional a la raíz cuadrada del gradiente).

El coeficiente de permeabilidad equivalente (para cálculos simplificados de redes de filtración) de las escolleras, en estos problemas de filtración en régimen turbulento, es tanto mayor cuanto mayor es el tamaño medio (D_{50}) de la escollera y cuanto más uniforme es su granulometría.

Si en los suelos granulares naturales (arenas y gravas o sus mezclas), la permeabilidad en régimen laminar ($Re < 1$) crece con el cuadrado de su diámetro eficaz, en las escolleras sometidas a la acción del oleaje este efecto de la granulometría es más moderado. El crecimiento de la permeabilidad en régimen turbulento parece controlado también por algún tamaño representativo (puede ser el D_{50}) pero crece con la raíz cuadrada de ese tamaño.

Las permeabilidades equivalentes de escolleras suelen ser del siguiente orden de magnitud (para el régimen turbulento que se viene considerando):

	Tamaño medio D_{50} (mm)	Permeabilidad equivalente (m/s) ⁽⁷⁾
Grandes bloques	850-2.500	1,00
Tamaños medios	100-300	0,30
Tamaños pequeños	10-80	0,10

El ingeniero debe investigar la permeabilidad de las escolleras a utilizar en su proyecto, particularmente en las zonas del núcleo y del manto intermedio. Esos datos pueden ser necesarios en cálculos posteriores del proyecto, al ser muy relevantes para definir las características del flujo a través del medio poroso y las condiciones de generación y disipación de presiones intersticiales, tanto en Fase de Construcción como de Servicio.

(7) Datos tomados del Manual del CIRIA. Publicación n° 83. Ver referencias

La investigación de la permeabilidad en régimen turbulento puede hacerse en laboratorios especializados. Los procedimientos de ensayo y los efectos de escala se salen del alcance de esta ROM.

Los modelos físicos que tratan de representar el comportamiento hidrodinámico de las escolleras frente al oleaje pueden dar resultados con importantes incertidumbres respecto al comportamiento real debido a las dificultades de escalar adecuadamente las características del flujo en el medio poroso (turbulento o laminar) con el número de Froude en todos y cada uno de los materiales que constituyen la estructura. Esto es especialmente relevante en aquellas estructuras formadas por materiales de diferentes tamaños y en las que pueden ser significativos los procesos de generación y acumulación de presiones intersticiales, al ser muy difícil escalar con Froude las propiedades constitutivas de los materiales, simultáneamente en las áreas con tamaños grandes y en aquellas con tamaños pequeños. Una escala de tamaños estudiada y la utilización de fluidos más viscosos pueden reducir algunos de estos problemas.

d. Deformabilidad de las escolleras

La deformabilidad de las escolleras se debe, sólo en una pequeña parte, a la compresión elástica de los fragmentos rocosos que la forman. Esa parte de la deformación sería recuperable con la descarga. Existen otras causas de deformación, tales como la rotura de contactos, el arrastre o lavado de los finos, por la acción del oleaje, etc., que son origen de deformaciones irreversibles.

En los proyectos de los diques interesa conocer ambas componentes de la deformación. Como parámetros de deformación elástica se pueden utilizar módulos de elasticidad u otros valores semejantes que se describen en el apartado 2.2.10 para representar la deformación del terreno.

Para cargas cíclicas, alternativas o impulsivas como las debidas tanto a la actuación directa del oleaje como a los movimientos de la estructura resistente causados por dicha acción, la deformabilidad puede ser diferente, como ocurre con otros tipos de terreno. Ver 3.10.

La deformación no recuperable debe obtenerse consultando la experiencia publicada o haciendo ensayos "in situ" o de laboratorio, especialmente diseñados al efecto. Debe señalarse que los modelos físicos asociados al comportamiento hidrodinámico de las escolleras frente al oleaje no son representativos de su deformabilidad, ya que, tal como se ha indicado en el apartado c), es muy difícil escalar con Froude las propiedades constitutivas y, en particular los parámetros de deformación. Este problema también puede representar una incertidumbre sobre los resultados del comportamiento hidrodinámico en aquellos casos en los que el modelo se comporte a efectos de deformabilidad de forma muy diferente al previsto como comportamiento real.

Las fluctuaciones de tensiones en las escolleras de los diques causan deformaciones permanentes (se dice que la acción del oleaje lo consolida). Esas deformaciones pueden ser causa de asentamientos postconstructivos importantes, incluso de más del 2% de la altura del dique en talud (o del espesor de banquetas en un dique vertical).

4.7.3 Verificación de la seguridad frente a los modos de fallo de tipo geotécnico

De acuerdo con lo señalado en el apartado 3.2.1 de esta ROM, en determinados tipos estructurales entre los que se encuentran aquéllos en los que el oleaje y demás oscilaciones del nivel del mar u otro agente del medio físico es el agente predominante en el desencadenamiento de los modos de fallo geotécnicos, no es posible admitir probabilidades de ocurrencia individual de algunos de estos modos de fallo claramente menores (de otro orden de magnitud) que las indicadas en la ROM 0.0 para el conjunto de fallos sin incidir de forma relevante en la optimización económica de la obra.

Es decir, en estos casos, al contrario que el criterio general adoptado en esta Recomendación de verificar la seguridad frente a modos de fallo geotécnicos considerando probabilidades de fallo muy bajas en relación a la conjunta admitida para la totalidad de la estructura, algunos modos de fallo geotécnicos deberán ser considera-

dos como modos de fallo principales y, por tanto, no podrá despreciarse su contribución en el cálculo de la probabilidad global de fallo.

Estos efectos son particularmente relevantes en los diques de abrigo, en los que alcanzar aumentos significativos de la fiabilidad de la estructura ante determinados modos de fallo geotécnicos es muy difícil de conseguir o está muy alejado del que resulta adecuado desde un punto de vista económico.

4.7.3.1 Elección de la probabilidad de ocurrencia de un modo de fallo geotécnico

La probabilidad conjunta de fallo, durante la Fase de proyecto analizada, para un dique de abrigo frente a los modos de fallo adscritos a Estados Límite Últimos deberá ser menor que los valores máximos recomendados en la ROM 0.0 en función del índice de impacto social y ambiental (ISA) que le corresponda, y obtenida siguiendo métodos de optimización económica.

Una vez determinada la probabilidad conjunta de fallo de proyecto, la asignación de la probabilidad de ocurrencia correspondiente a cada modo de fallo podrá realizarse de arriba abajo en el diagrama de fallos, tomando en consideración el tipo de cada tramo del diagrama (en serie o en paralelo) y la independencia o grado de correlación entre los diferentes modos, así como la influencia en los costes de la obra de la probabilidad de fallo asignada a cada modo. En este sentido, en general se asignarán las menores probabilidades a aquellos modos de fallo para los cuales conseguir aumentos de fiabilidad sean poco relevantes en los costes. En consecuencia, a los modos de fallo en los que mejorar la fiabilidad es difícil o se puede hacer únicamente con aumentos muy importantes de los costes, se les asignarán probabilidades de fallo cercanas a la probabilidad conjunta de fallo.

En la ROM I.1 se incluirán los correspondientes diagramas de fallo para cada tipología de dique de abrigo, así como las oportunas recomendaciones para la asignación de probabilidades de fallo a cada uno de los modos de fallo.

Simplificadamente, para cada parte del dique (cimentación, cuerpo central y superestructura) podrá considerarse que los modos de fallo del tipo geotécnico cuyo aumento de fiabilidad tiene mayor influencia en el coste son fallos principales. La probabilidad de ocurrencia asignada a cada uno de dichos modos considerando los diferentes grados de correlación resultará ser menor, algo menor o incluso igual a la probabilidad global de fallo asignada a cada parte del dique.

Comentario: Si se considera que en la mayor parte de los casos los grados de fiabilidad del cimiento y del cuerpo central del dique son los que inciden más en los costes de la obra, simplificadamente puede adoptarse como solución repartir entre estas partes el grueso de la probabilidad de fallo máxima recomendada en función del ISA que le corresponda, en función de su incidencia en los costes de la obra. Por tanto, de acuerdo con este apartado, como cota superior, las probabilidades de fallo asignadas a los modos de fallo de tipo geotécnico principales asociados a cada una de estas partes del dique podrán tomarse iguales a la probabilidad global de fallo asignada a esa parte del dique. Ver Fig. 4.7.6. Si para alguna tipología y ubicación, la influencia en los costes del grado de fiabilidad de cada parte del dique fuera otra, la probabilidad conjunta de fallo se repartirá en función de los mismos, pudiendo tomarse como probabilidad de fallo de cada una de las partes el tercio de la probabilidad conjunta de fallo de la obra en el caso de que la influencia en el coste global de cada una de las partes fuera similar.

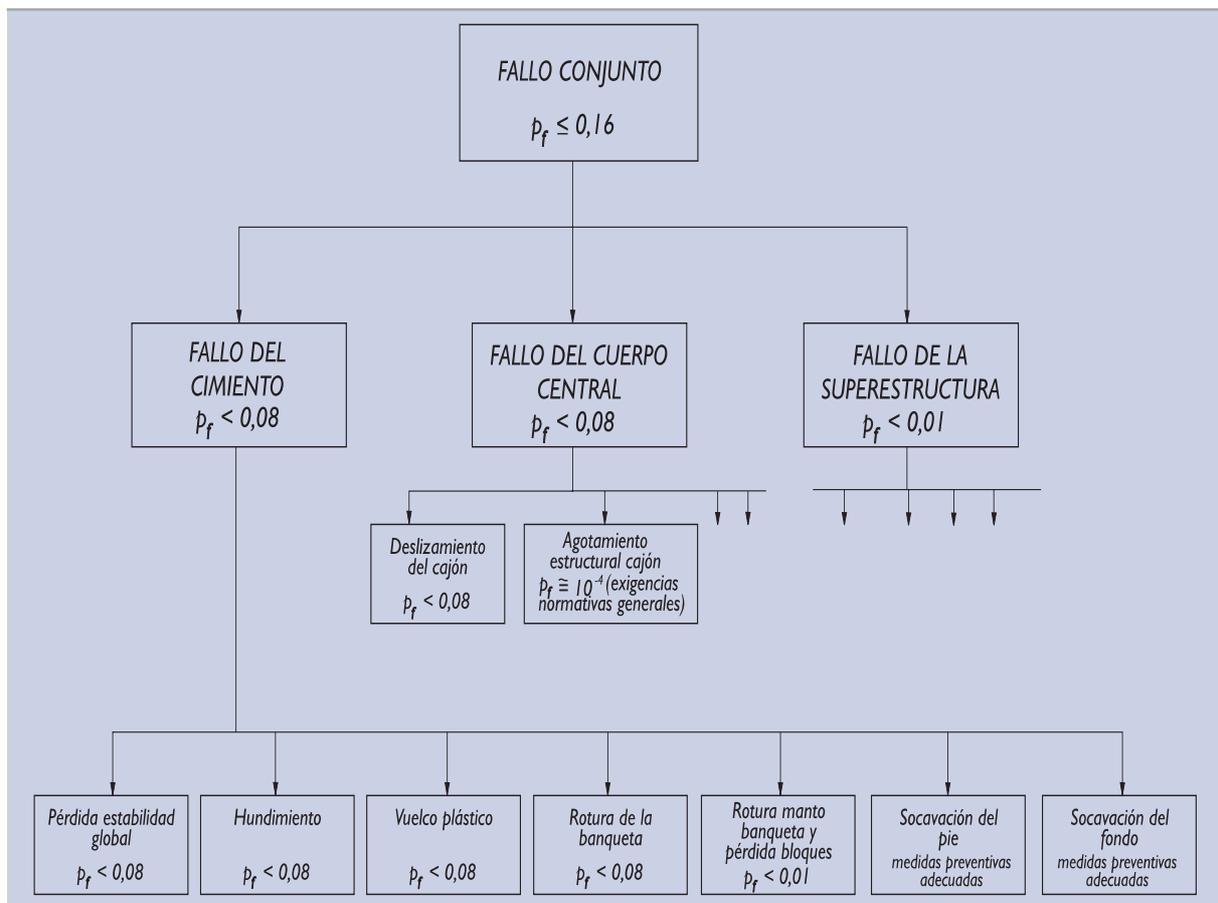
4.7.3.2 Elección del procedimiento de verificación para cálculos de Nivel I

Para verificar la seguridad de un dique de abrigo mediante el procedimiento de Nivel I, el ingeniero deberá optar por uno de los dos caminos que a continuación se indican en función de la probabilidad de fallo asignada al modo de fallo en cuestión.

El primer procedimiento es el estándar que se sigue en todos los casos contemplados en esta ROM y que puede tener aplicación cuando las probabilidades de fallo asignadas al modo de fallo en cuestión son bajas, en todo caso inferiores al 5%. Para probabilidades de fallo mayores el método puede resultar poco adecuado.

El segundo procedimiento es específico para aquellas estructuras en las que un agente o agentes del medio físico son los predominantes en el desencadenamiento de los modos de fallo, como en el caso de los diques de abrigo lo es la acción del oleaje y demás oscilaciones del mar. Debe utilizarse para estudiar modos de fallo cuya probabilidad de fallo sea mayor o igual que el 5 %, ya que valores menores obligan a la consideración de las acciones climáticas asociadas a periodos de retorno muy altos cuya definición puede ser tan dudosa que haga el método de verificación tan impreciso como el método general.

Figura 4.7.6. Diagrama de fallo de un dique vertical asociado a Estados Límite Últimos. Obras de ISA no significativo ($ISA < 5$). Ejemplo simplificado de asignación de probabilidades de fallo, considerando que la probabilidad conjunta de fallo obtenida por criterios de optimización económica es 0,16



Las diferencias entre estos dos métodos estriba en dos detalles esenciales: la definición del valor de cálculo de la acción del oleaje (1) y el valor del coeficiente de seguridad o margen de seguridad que debe obtenerse como resultado de la verificación (2).

MÉTODO ESTÁNDAR ROM 0.5

Este método ha sido ya descrito a lo largo de esta ROM con todos sus detalles. En lo que respecta a la acción del oleaje, según el método estándar, el valor de cálculo es igual al valor característico afectado por el coeficiente de mayoración y el coeficiente de compatibilidad que corresponda. Esto es:

$$E_d = E_n \cdot \gamma_E \cdot \psi$$

Los valores del coeficiente de mayoración y de los coeficientes de compatibilidad son los indicados en la Parte 3 de esta ROM.

El valor característico de la acción variable del oleaje y demás oscilaciones del mar se determinará tal como se indica en la Parte 3 de esta ROM. En general se adoptará el correspondiente al estado de mar asociado al temporal con una probabilidad anual de excedencia igual al 2% tomada del régimen extremal, como se define para cualquier otra acción variable (periodo de retorno de 50 años).

Cuando se utilice este método se considerará también una acción extraordinaria del oleaje, adoptándose como valor característico de esta acción el correspondiente a una probabilidad anual de excedencia del agente oleaje del 0,2 %, tal como se define para cualquier otra acción extraordinaria (periodo de retorno de 500 años).

Los coeficientes de seguridad que deben obtenerse al verificar cada modo de fallo y los procedimientos de cálculo asociados se especifican en los apartados que siguen.

MÉTODO ESPECÍFICO

En este procedimiento el valor de cálculo que representa la acción variable del oleaje, cuando es la acción preponderante, se define con un criterio diferente. Formalmente el valor de cálculo de la acción es:

$$E_d = E_n^* \cdot \Psi$$

El valor característico, en este caso E_n^* , es aquél asociado al estado de mar del temporal cuya probabilidad de excedencia durante el periodo de tiempo asignado a la situación o estado de proyecto en cuestión es precisamente igual a la probabilidad de fallo asignada al modo de fallo que se analiza. Esto puede obligar a definir un oleaje de cálculo diferente para cada situación o estado de proyecto y, dentro de ella, para cada modo de fallo en cuestión.

El valor característico no se mayor y sólo es afectado por su valor de combinación ψ . Como la acción del oleaje es la predominante, esto es, el oleaje es la acción principal de una combinación fundamental, el valor del coeficiente de combinación es igual a la unidad ($\psi = 1$).

El coeficiente de seguridad que debe adoptarse cuando se proceda con este método debe ser menor que el que se define con carácter general en esta ROM y habrá de calcularse expresamente para cada modo de fallo en cuestión, igual que se hace con la acción del oleaje.

Para obtener una probabilidad de fallo p_f se puede adoptar un coeficiente de seguridad F que viene dado por la expresión siguiente:

$$F = \frac{e^{\zeta(\beta_0 + \frac{1}{2}\zeta)}}{1 + \beta_0 v_A} \geq 1$$

donde:

- β_0 = índice de fiabilidad asociado a la probabilidad de fallo p_f . Viene dado por la expresión $\beta_0 = \phi^{-1}(1-p_f)$. En esta expresión ϕ es la función de probabilidad acumulada estándar normalizada y ϕ^{-1} es la función inversa.
- v_A = coeficiente de variación del valor de la acción. A falta de datos más precisos, el coeficiente de variación de la acción del oleaje en mar abierto puede tomarse del orden de 0,18 en el Mediterráneo y de 0,14 en el Atlántico.
- ζ = desviación típica de $\ln F$. Este valor es aproximadamente igual al coeficiente de variación de F .

La obtención del valor de ζ requiere un cálculo específico de sensibilidad como el indicado en el apartado 3.3.10 o similar. A título orientativo, para los métodos de cálculo propuestos en esta Recomendación, se puede suponer el siguiente valor:

ζ	=	0,15 a 0,20	Problemas de estabilidad global y de deslizamiento.
ζ	=	0,20 a 0,25	Problemas de hundimiento sin drenaje.
ζ	=	0,30 a 0,35	Problema de hundimiento con drenaje.

Dentro del rango indicado para el valor de ζ se elegirá un valor tanto mayor cuanto mayor sea el coeficiente de variación de la acción. En general y por lo dicho antes, en la costa mediterránea deben usarse valores de ζ mayores que en las costas atlánticas.

Es posible, también, aunque se quedaría en general del lado de la seguridad, y esto podría no ser adecuado, utilizar como valores de F los mismos que se indican para el procedimiento general.

Cuando la probabilidad de fallo considerada sea mayor o igual que el 5%, el coeficiente de seguridad exigible a las combinaciones excepcionales (accidentales y sísmicas) simplificadoamente se tomará igual a la unidad, siempre que el valor de combinación de las acciones variables y el valor característico de las acciones extraordinarias y sísmicas se definan del modo estándar establecido en esta Recomendación (periodo de retorno del orden de 500 años para las acciones extraordinarias). De otra forma más precisa, alternativamente podría comprobarse una combinación fundamental considerando que la acción sísmica (u otra extraordinaria) se comporta como una acción variable preponderante, definiéndose su valor característico como aquél cuya probabilidad de excedencia durante el periodo de tiempo asignado a la situación de proyecto en cuestión es igual a la probabilidad de fallo que se analiza. En ese caso el coeficiente de seguridad exigido se obtendrá de la misma forma que la definida para el oleaje.⁽⁸⁾

La combinación cuasi-permanente que suele considerarse en los cálculos convencionales del método general no es preciso considerarla cuando se utilice este método de verificación. Esa combinación sólo será utilizada, sin coeficientes de mayoración, para comprobar el comportamiento satisfactorio frente a Estados Límite de Servicio.

4.7.4 Diques en talud emergido

Cada dique de abrigo tendrá unos condicionantes propios que obligarán al proyectista a realizar cuantos estudios sean necesarios para asegurar el buen comportamiento frente a todos los posibles fallos previsible.

Existen, sin embargo, algunos aspectos geotécnicos comunes a todos los diques en talud cuya consideración será siempre obligada. Los indicados en la Fig. 4.7.7 son los principales modos de fallo geotécnicos e hidráulicos, adscritos a Estados Límite Últimos, los cuales se comentan en los apartados que siguen.

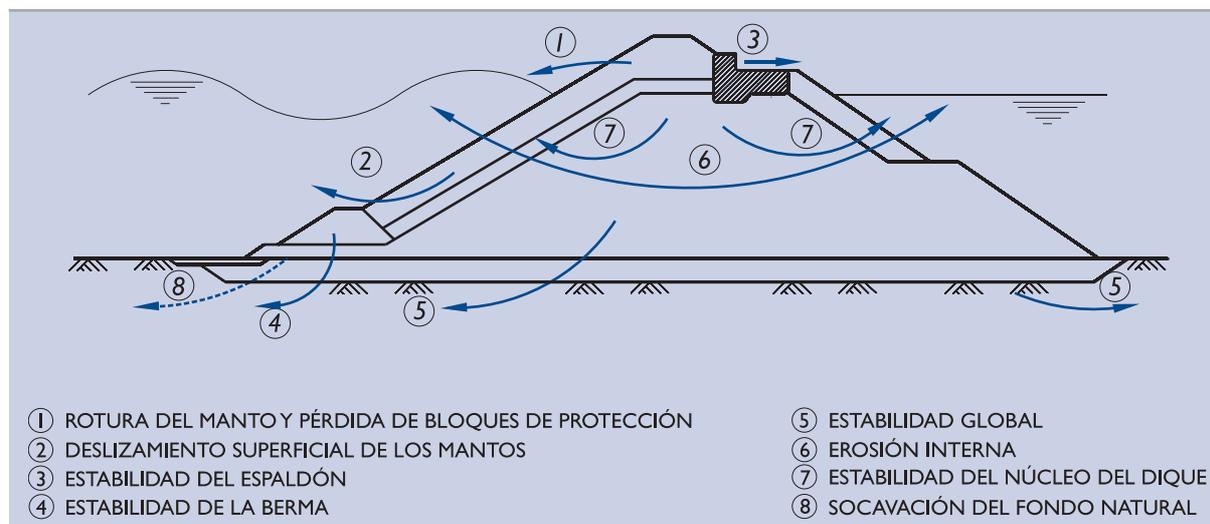
4.7.4.1 Verificación de la seguridad frente a la rotura del manto principal

La rotura del manto de protección y la pérdida de alguno de sus bloques, arrastrados por el mar, es el modo de fallo hidráulico principal a considerar en el proyecto de los diques en talud y al que más atención se le suele dedicar.

Los bloques de protección que forman el manto principal deben ser de tamaños y formas adecuadas al oleaje de proyecto. Las comprobaciones de estabilidad suelen hacerse mediante fórmulas empíricas basadas en la observación del comportamiento real y en la realización de ensayos en modelos físicos a escala reducida (son fórmulas como la de Iribarren, Hudson, etc.). Es recomendable realizar en laboratorio una comprobación experimental de la solución adoptada.

(8) A falta de datos más precisos la relación entre la aceleración básica sísmica asociada a un periodo de retorno de 500 años con la correspondiente a otro periodo de retorno responde a la siguiente formulación: $a_{b,T} = a_{b,500} (T/500)^{1/2,7}$. A su vez, el coeficiente de variación de la acción sísmica puede considerarse a estos efectos igual a 0,2.

Figura 4.7.7. Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques en talud emergidos



Las ecuaciones de verificación de la seguridad frente a este modo de fallo se incluyen de una forma detallada en la ROM I.1.

4.7.4.2 Verificación e la seguridad frente al deslizamiento superficial del manto

El manto de protección externo puede deslizarse a lo largo de su contacto con el manto secundario. Este problema puede resolverse con medidas preventivas tales como la inclusión de llaves (piezas de mayor tamaño que atraviesen ese contacto y rompan su continuidad) o la construcción de bermas de refuerzo en el pie del dique u otras similares. En España, la inclusión de llaves no es habitual y en piezas artificiales no es recomendable.

El manto de protección secundario puede deslizarse a lo largo de su contacto con el núcleo del dique. Si este modo de fallo ocurriese, el manto principal sería también arrastrado en el deslizamiento.

Estos deslizamientos casi planos, con buena parte de la superficie de rotura discurrendo a lo largo de contactos de escolleras de distintas granulometrías, pueden estudiarse con los procedimientos generales de cálculo que se indican en el apartado 3.8.

En esos cálculos debe suponerse que la resistencia al corte de los contactos entre capas es puramente friccional ($c = 0$) y adoptarse como ángulo de rozamiento de cálculo un ángulo menor que el de la escollera inmediatamente superior al plano de deslizamiento. Esto es:

$$\phi_{\text{cálculo}} = \phi \cdot r^n$$

donde:

ϕ = ángulo de rozamiento de la escollera inmediatamente superior al plano de deslizamiento. Debe ser definido en el informe geotécnico tal como se indica en el apartado 4.7.2.2.

r = relación de tamaños medios de la escollera inferior al plano de deslizamiento y la escollera situada inmediatamente encima = $(D_{50, \text{inferior}})/(D_{50, \text{superior}}) < 1$

n = parámetro adimensional que puede investigarse en laboratorio y que, a falta de mejor información, para tamaños relativamente uniformes puede suponerse igual a 0,3.

La incógnita principal en estos cálculos es el estado de presiones intersticiales en el contacto, el cual depende, entre otros parámetros, de la permeabilidad de los distintos mantos y de las modificaciones en el régimen hidráulico producidas por la presencia o no de espaldones. En general, como primera aproximación, se puede suponer que el dique es impermeable por debajo del plano de deslizamiento y que la escollera es arrastrada por un flujo de agua paralelo al talud, examinando la situación en el momento en que la ola, en su contacto con el paramento del dique, está en la situación más baja.

Cuando el deslizamiento sea de gran longitud comparado con el espesor de la masa deslizante se podrá utilizar la fórmula simplificada de deslizamientos planos indicada en el apartado 3.8.4.4.

El ingeniero puede plantearse cálculos más complejos, que tengan en cuenta efectos tridimensionales, así como valores de la subpresión acordes con la realidad esperada y que pudiera haber obtenido de los estudios en modelo reducido.

En la ROM I.I se incluirán métodos detallados para la verificación de este modo de fallo.

La estabilidad frente a los deslizamientos planos, descritos en este apartado, puede no quedar garantizada por un buen comportamiento en el ensayo en modelo reducido. Salvo que en la preparación del modelo se tomen precauciones especiales, los ángulos de rozamiento que allí puedan existir serán, en general, mayores que los que puedan ocurrir en obra.

La verificación de la seguridad puede darse por satisfecha cuando quede probado que el coeficiente de seguridad obtenido sea, al menos, superior al mínimo que se indica más adelante, en la Tabla 4.7.1.

4.7.4.3 Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del espaldón

La estabilidad del espaldón es claramente dependiente de la posible actuación directa del impacto del oleaje. La definición de las fuerzas, así como de las subpresiones que actúan sobre el espaldón debidas a la acción del oleaje, puede encontrarse en la ROM I.I.

La verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del espaldón podrá aproximarse mediante el cálculo de los coeficientes de seguridad correspondientes al deslizamiento y al vuelco, considerando como fuerzas estáticas equivalentes a la acción del oleaje las correspondientes al máximo empuje, las cuales se definen a partir de formulaciones empíricas de base experimental (ver ROM I.I.) Para este cálculo se puede seguir el procedimiento general que se indica en el apartado 3.7 (muros de gravedad). La verificación de la seguridad puede darse por concluida si los coeficientes de seguridad obtenidos son iguales o superiores a los indicados en la Tabla 4.7.1.

Normalmente el espaldón apoyará sobre un relleno granular con capacidad portante suficiente para que no sea necesario considerar los modos de fallo “vuelco plástico” y “estabilidad global”. Pero esto ha de comprobarse. Cuando este aspecto por alguna circunstancia sea crítico, deberá ser analizado con detalle. La verificación de la seguridad puede darse por satisfactoria si el coeficiente de seguridad frente a estos modos de fallo alcanza o supera los valores mínimos indicados en la Tabla 4.7.1.

4.7.4.4 Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad de la berma

La berma de contención y refuerzo que puede disponerse en el pie del talud del dique puede deslizar o bien a favor del contacto con el suelo natural o bien según líneas de rotura más profundas que afecten al terreno natural.

Este problema de estabilidad debe analizarse siguiendo las recomendaciones que se indican para el cálculo de estabilidad global que se comenta en el apartado que sigue.

4.7.4.5 Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global

Una vez comprobada la estabilidad de los mantos de protección del dique, los modos de rotura por deslizamiento que pueden ocurrir son la rotura del núcleo y la rotura del cimientado del dique. Ambas roturas pueden producirse según líneas aproximadamente circulares, tal como se indica en la Fig. 4.7.8.

En este apartado se considera la rotura profunda que, de ocurrir, provocaría la ruina completa de la obra. La rotura del núcleo sin implicar al cimientado se analiza en el apartado 4.7.4.7.

El oleaje no debe provocar excesos de presión intersticial importantes en el núcleo de los diques por motivo de su densificación. Las presiones intersticiales que pueden generarse serían las correspondientes al flujo transitorio creado por el oleaje y pueden calcularse en condiciones de esqueleto elástico. Puede ser considerado el carácter no lineal de esa respuesta elástica.

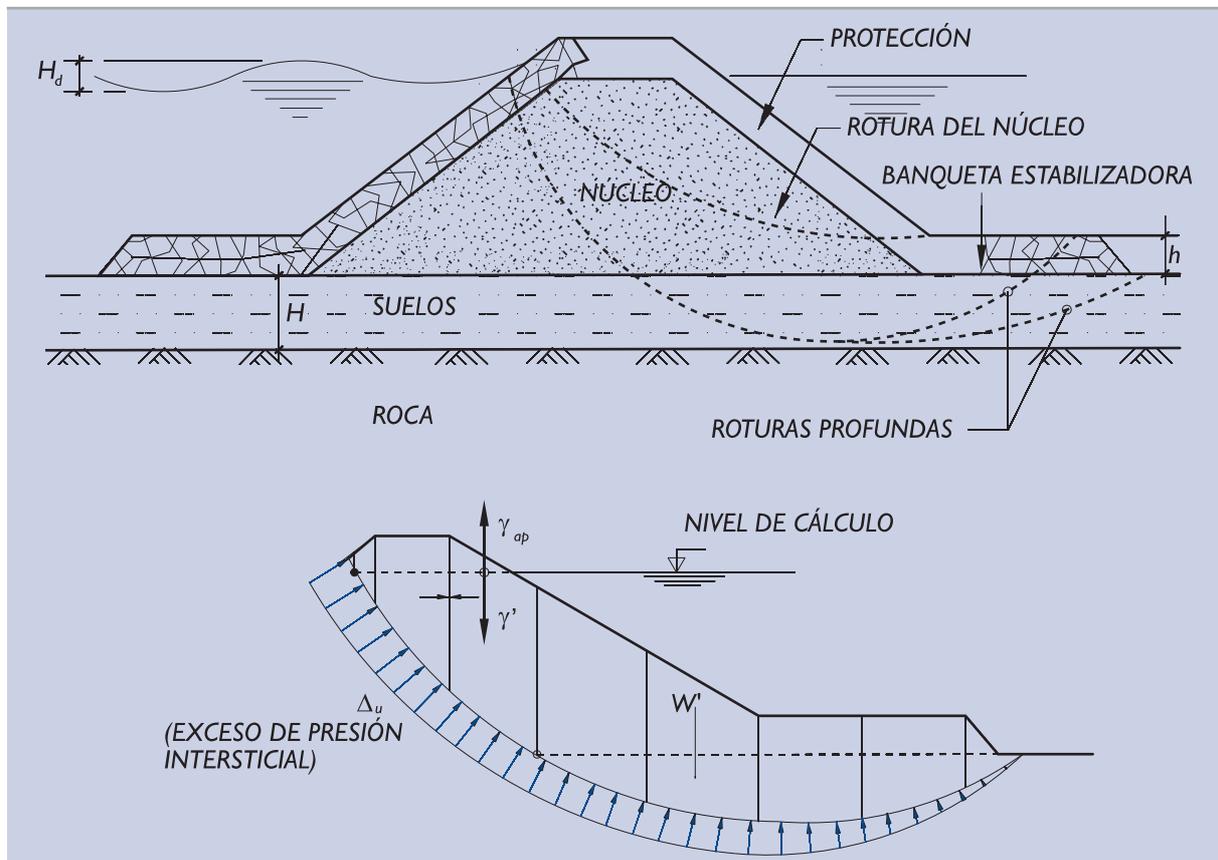
Para analizar el problema de la estabilidad global es necesario definir los siguientes factores de proyecto:

a. Definición de las propiedades del terreno natural

La pérdida de la estabilidad global únicamente puede ocurrir cuando el dique se construye sobre terrenos poco resistentes que, en general, serán también poco permeables.

Para evaluar la estabilidad del dique, será necesario calcular previamente el grado de consolidación alcanzado por el cimientado. A esos efectos se pueden seguir las recomendaciones que se indican en el apartado 3.4.8 u otras más complejas.

Figura 4.7.8. Estabilidad de diques de abrigo. Fuerzas actuantes en situación de ascenso del flujo de agua (Run-Up)



Conocido el grado de consolidación del cimientado que corresponde a cada situación de proyecto que se pretende analizar, se debe definir una resistencia que esté acorde con ese grado de consolidación.

En ese sentido pueden darse tres situaciones típicas:

1. Situación de consolidación prácticamente nula.

Si el grado de consolidación del terreno natural que corresponde a la situación de proyecto es bajo (del orden del 50% o menor), existirán zonas del cimientado en las que los excesos de presión intersticial son muy elevados y la ganancia de resistencia ha sido aún pequeña. En esos casos, es recomendable representar el cimientado con un ángulo de rozamiento nulo y con una cohesión igual a la resistencia la corte sin drenaje que el cimientado tuviera antes de iniciarse la obra.

2. Situación de consolidación prácticamente completa.

Si el grado de consolidación del terreno natural, correspondiente a la situación de proyecto, es superior al 90% y eso ocurre con parámetros de cálculo conservadores (deducidos de ensayos edométricos, por ejemplo), el cálculo de estabilidad global puede hacerse en término de presiones efectivas, tomando como parámetros de cálculo la cohesión y el rozamiento del terreno natural. No se tendrían en cuenta excesos de presión intersticial por este motivo.

3. Situaciones intermedias.

En estas situaciones debe, o bien optarse por la solución más conservadora, o bien estimar los excesos de presión intersticial aún pendientes de disiparse, que serán diferentes en cada punto del terreno natural, y tenerlos en cuenta en los cálculos. En esta segunda opción los parámetros de cálculo serían el rozamiento y la cohesión del terreno, los mismos que si se hubiera completado la consolidación.

A los efectos de caracterizar la resistencia del terreno natural a considerar en los cálculos, deberá tomarse en consideración los efectos causados por la acción dinámica del oleaje y de otras oscilaciones del mar en la misma, los cuales pueden variar el comportamiento del suelo, introducir presiones intersticiales adicionales y fuerzas hidrodinámicas de filtración en el terreno natural y en el cuerpo central del dique y, en definitiva, alterar significativamente la capacidad resistente de los mismos. En los apartados 3.4.11- Presiones intersticiales generadas por el oleaje y otras oscilaciones del nivel del mar y 3.10- Efectos dinámicos, de esta ROM, se incluyen algunas recomendaciones al respecto. A su vez, en la ROM 1.1 se desarrollarán más ampliamente los modelos analíticos de comportamiento conjunto del suelo y de la obra frente a la acción del oleaje, señalándose los casos en los que se pueden aplicar cada uno de ellos para el cálculo de la evolución de las presiones intersticiales, tanto en el terreno natural como en las diferentes capas y en el núcleo del dique.

b. Definición de las propiedades del núcleo del dique

La resistencia del núcleo del dique debe representarse en estos cálculos tal como se indica en el apartado 4.7.4.7.

c. Definición de los estados o situaciones de proyecto

Las situaciones de proyecto más críticas, y que el ingeniero debe analizar siempre, son:

- ◆ Distintas Fases de Construcción.
- ◆ Final de construcción, cuando la carga sobre el cimientado es máxima y el cimientado aún se ha consolidado durante poco tiempo.
- ◆ Fase de Servicio.

El ingeniero debe plantear otras situaciones de proyecto que puedan tener interés en su caso particular.

d. Definición de las acciones

La acción fundamental en el cálculo de los problemas de estabilidad, tanto local en el interior del dique como global, es el peso propio. La acción del oleaje es, en general, más relevante cuanto menos profundo sea el deslizamiento que se analiza. El valor característico de la acción del oleaje y demás oscilaciones del mar, así como sus valores de combinación, se definen en el apartado 4.7.3.2.

Como consecuencia del oleaje y de otras oscilaciones del mar, las presiones totales en los contornos externos del dique y de su cimiento, así como las presiones intersticiales generadas en su interior y en el terreno natural, que son necesarias tomar en consideración para realizar los cálculos de estabilidad son variables en el tiempo y en el espacio. Para facilitar los cálculos podrán considerarse como situaciones estáticas equivalentes las siguientes:

- ◆ Situación de máximo ascenso del flujo de agua (run-up).
- ◆ Situación de máximo descenso del flujo de agua (run-down).

Con nivel del mar correspondiente tanto a marea alta como a marea baja. En general, la situación de marea baja será la más crítica respecto a la estabilidad global.

En la mencionada Fig. 4.7.8 se representan esquemáticamente las acciones que deben considerarse en la verificación de la estabilidad.

En dicha figura, W' es el peso de una de las rebanadas de la masa deslizante. Este peso se calculará con los pesos específicos sumergidos por debajo del nivel del mar y con los pesos aparentes por encima de dicho nivel. Las variables N' y S' son, respectivamente, las resultantes de las tensiones efectivas normales y de corte a lo largo de la línea de rotura, y Δu es la ley de exceso de presiones intersticiales sobre la hidrostática generada por el oleaje a lo largo de la línea de rotura. También debe suponerse que puede existir cierto exceso de presión intersticial remanente debido al cambio del nivel medio del mar (marea). En cualquier caso, las leyes de distribución de las diferentes presiones intersticiales en exceso sobre la hidrostática se desarrollan más detalladamente en la ROM I.I.

Alternativamente, puede realizarse el cálculo eliminando las presiones intersticiales del contorno de la masa deslizante y añadir, en su lugar, las fuerzas de arrastre correspondientes a la red de filtración correspondiente. Ver apartado 3.4.5.

El cálculo del coeficiente de seguridad se puede realizar siguiendo las recomendaciones indicadas en el apartado 3.8.4. El valor que se obtenga debe satisfacer el requisito mínimo indicado en la Tabla 4.7.1.

4.7.4.5.1 ESTABILIZACIÓN CON BERMAS

En aquellas ocasiones en las que la estabilidad del dique resulta insuficiente, se puede recurrir a disponer, a cada lado del dique, unas banquetas de escollera, o de materiales granulares debidamente protegidos contra la erosión.

En esos casos, la evaluación de la seguridad realizada con métodos que suponen deslizamientos circulares (método simplificado de Bishop, por ejemplo) puede conducir a resultados optimistas debido al «efecto cuña» explicado en el apartado 3.8.4.5 de esta ROM. Por ese motivo, o bien se modifica adecuadamente el método de cálculo, o bien se utilizan métodos de cálculo que no impliquen ni roturas circulares ni inclinaciones de los empujes entre rebanadas que puedan producir el efecto mencionado.

Sin perjuicio de otros métodos, es aceptable, en estos casos, sustituir el efecto beneficioso de la banqueta por una fuerza horizontal externa igual a:

$$E = \frac{1}{2} \gamma' K_{ph} h^2$$

donde:

- γ' = peso específico sumergido del material que forma la banqueta.
 K_{ph} = coeficiente de empuje pasivo horizontal estimado con $\delta = 0$. Ver apartados 3.7.6 y 3.7.7.
 h = espesor de la banqueta en el punto de emergencia de la línea de deslizamiento.

A efectos de calcular este empuje, se tomará como ángulo de rozamiento de la banqueta:

$$\text{tg}\phi_{(\text{cálculo})} = \frac{1}{F} \text{tg}\phi$$

donde:

- $\phi_{(\text{cálculo})}$ = ángulo de rozamiento de cálculo.
 ϕ = ángulo de rozamiento de la banqueta.
 F = coeficiente de seguridad frente al deslizamiento según la línea de rotura que se tantea.

Como quiera que el coeficiente de seguridad al deslizamiento “F” es desconocido a la hora de evaluar el empuje “E”, éste debe estimarse previamente suponiendo un valor de “F” razonable y después ajustarse por algún procedimiento iterativo sencillo.

Además se comprobará que el empuje, E, calculado como se indica es menor que el que produciría una condición de deslizamiento horizontal del tramo de banqueta asociado, que es:

$$E_{(\text{máx})} = \frac{\gamma' \cdot L \cdot h \cdot \text{tg}\phi_s + c_s \left(L + \frac{1}{2} \cdot h \right)}{F}$$

ó

$$E_{(\text{máx})} = \frac{\gamma' \cdot L \cdot h \cdot \text{tg}\phi}{F}$$

según que el deslizamiento plano se produzca a través del terreno natural (parámetros resistentes c_s, ϕ_s) o de la propia banqueta.

Este procedimiento de cálculo simplificado se ilustra en la Fig. 4.7.9.

4.7.4.6 Verificación de la seguridad frente a la erosión interna

El movimiento del agua en el entorno del dique origina flujos y reflujos en la zona próxima a los paramentos que pueden ocasionar arrastres del material que forma el núcleo del dique a través de las protecciones. La gradación de granulometrías debe estudiarse ya sea por vía numérica, tal como se explica en el apartado 3.4.8 de esta ROM, ya sea por vía experimental mediante ensayos en modelo reducido.

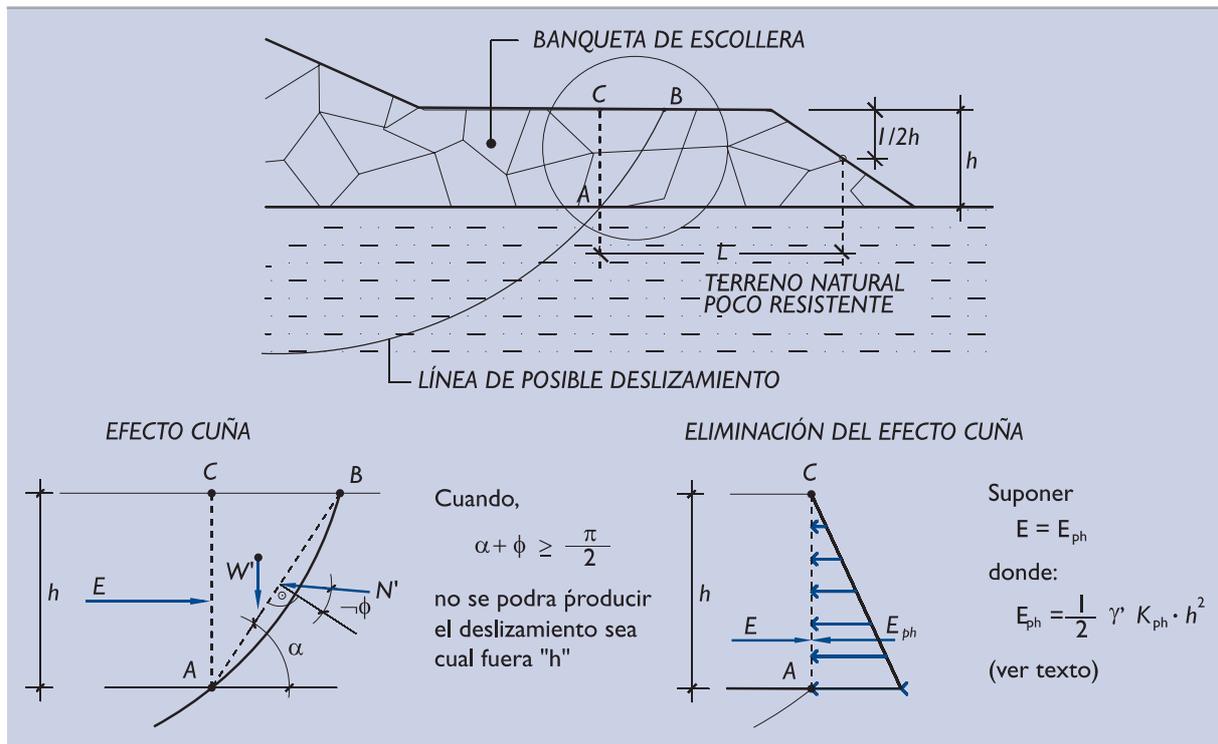
4.7.4.7 Verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad del núcleo

La rotura del dique según líneas de deslizamiento aproximadamente circulares que se desarrollen fundamentalmente dentro del núcleo es un mecanismo de fallo que el ingeniero debe examinar. Esa forma de rotura se ha ilustrado en el esquema de la Fig. 4.7.8 (rotura del núcleo).

La resistencia del núcleo, que normalmente estará formado por escollera o por un todo-uno de cantera, se habrá analizado previamente al realizar el estudio de materiales que se describe en 4.7.2.2.

Si en el cuerpo del núcleo existieran suelos más finos que pudieran ser sensibles a las alternancias de cargas que produce el oleaje, deberán seguirse las recomendaciones que se indican en 3.10 para analizar su resistencia.

Figura 4.7.9. Mejora de la estabilidad global con banquetas



La verificación de la seguridad frente a la pérdida de la estabilidad del núcleo del dique se realizará de acuerdo con lo establecido en el apartado 4.7.4.5, al poderse tratar como un caso particular de la estabilidad global. En la Fig. 4.7.8 también se representa este modo de fallo.

Al igual que para la verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global, la definición de las presiones intersticiales a lo largo de la línea de rotura es un problema muy complejo, particularmente en el caso de núcleos que no se comporten como rígidos y drenados frente a la acción dinámica del oleaje y demás oscilaciones del mar. En los apartados 3.4 y 3.10 de esta ROM, así como en la ROM I.1, se dan recomendaciones al respecto.

Para analizar la estabilidad del núcleo, deben tantearse líneas de rotura que afecten a ambos taludes del dique; al del lado mar y al del lado puerto.

Los coeficientes de seguridad que deben obtenerse deben cumplir unos requisitos mínimos como los indicados en la Tabla 4.7.1.

4.7.4.8 Verificación de la seguridad frente a la socavación del fondo natural

La erosión del terreno natural en la zona próxima al pie, o parte baja del talud de los diques de abrigo, es un problema importante de difícil cuantificación que puede analizarse sin demasiada fiabilidad bien empíricamente por medio de ecuaciones derivadas de resultados obtenidos en modelo físico de fondo móvil, bien mediante reglas de buena práctica basadas en la experiencia o en las observaciones de campo. A pesar de la experimentación llevada a cabo, no se han desarrollado todavía técnicas fiables para la estimación de estos procesos erosivos, los cuales parecen depender de la estructura y permeabilidad del talud, de las condiciones del oleaje incidente, de la profundidad y de las características del terreno natural, pudiéndose considerar que este efecto es mayor cuando aumenta el coeficiente de reflexión de la estructura. Es decir, en diques con pendientes tendidas y mayor permeabilidad estos efectos son mucho más reducidos. En la ROM I.1 se desarrollará más ampliamente la verificación de la seguridad frente a este modo de fallo.

Tabla 4.7.1. Coeficientes de seguridad mínimos para diques en talud emergidos (con probabilidad de ocurrencia en el modo de fallo del orden de 0,01)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo Geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes, F_1	Fundamentales o Características, F_2	Accidentales o Sísmicas, F_3
3.8.4.4	Deslizamiento superficial del manto	1,2	1,1	1
3.5.5 3.5.6 3.8.4.5 y 3.8.4.6	Pérdida de estabilidad del espaldón: deslizamiento, vuelco y estabilidad global	1,2	1,1	1
3.8.4.5 y 3.8.4.6	Pérdida de estabilidad de la berma	1,3	1,1	1
3.8.4.5 y 3.8.4.6	Pérdida de estabilidad global	1,3	1,1	1
–	Erosión interna	MP	MP	MP
3.8.4.5 y 3.8.4.6	Rotura del núcleo del dique	1,3	1,1	1
–	Socavación del fondo natural	MP	MP	MP

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM, descritos en este apartado 4.7 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Estos coeficientes de seguridad son válidos siempre que la probabilidad de ocurrencia admitida para cada modo de fallo sea del orden de 0,01 y se aplique el método estándar de verificación establecido en esta ROM. (Ver apartado 4.7.3). Para otras probabilidades de fallo, los coeficientes de seguridad mínimos fijados en esta tabla deberán modificarse de acuerdo con los criterios establecidos en los apartados 3.3.8 y 3.3.10 de esta ROM.

Nota 3: En aquellos casos en que el procedimiento de verificación elegido sea el específico por ser la probabilidad de fallo considerada mayor o igual a 0,05, los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán obtenidos a partir de la formulación incluida en el apartado 4.7.3.2.

Esta acción erosiva puede acentuarse cuando actúan corrientes transversales conjuntamente con el oleaje.

Como orden de magnitud, en fondos arenosos próximos al pie de los diques de abrigo se han observado socavaciones o movimientos transitorios durante los temporales con profundidades por debajo de la línea original del fondo superiores a la altura de la ola.

Dependiendo de la naturaleza del fondo, puede ser necesario prolongar horizontalmente las protecciones de los taludes, para cubrir los suelos naturales próximos al pie y alejar del dique las zonas de posible erosión. No obstante, para el dique esta solución puede tener efectos perjudiciales al poder producir un peraltamiento de la ola e, incluso, su rotura.

En el apartado 4.3.5.7 se indican algunas recomendaciones que pueden ser de interés en este caso.

4.7.4.9 Coeficientes de seguridad mínimos

Los coeficientes de seguridad frente a cada uno de los modos de fallo, considerados en los apartados precedentes, se han citado al describir el modo de fallo y al hacer las recomendaciones sobre el procedimiento de análisis. En la Tabla 4.7.1. se resumen los coeficientes de seguridad mínimos recomendados. Estos coeficientes son válidos únicamente cuando la probabilidad de fallo considerada para este modo de fallo sea del orden de 0,01 y se aplique el método estándar de verificación establecido en esta ROM. Para otras probabilidades de fallo, los coeficientes de seguridad mínimos fijados en esta tabla deberán modificarse de acuerdo con los criterios establecidos en los apartados 3.3.8 y 3.3.10. A su vez, en aquellos casos en que el procedimiento de verificación elegido sea el específico por ser la probabilidad de fallo considerada mayor o igual a 0,05, los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán obtenidos a partir de la formulación incluida en el apartado 4.7.3.2.

Estos coeficientes de seguridad son válidos únicamente para el método de cálculo indicado en la tabla. El ingeniero puede justificar en su proyecto la utilización de otros procedimiento de cálculo y de otros requisitos de seguridad asociados.

4.7.4.10 Asientos

Los diques de escollera se adaptan bien a las deformaciones del cimiento. La estimación de asientos es necesaria, a pesar de ello, para:

- ◆ Conocer la posible influencia en la cota de coronación del dique o en la cota de recrecido.
- ◆ Evaluar su efecto en posibles estructuras colocadas en su coronación (espaldones, firmes, etc.).

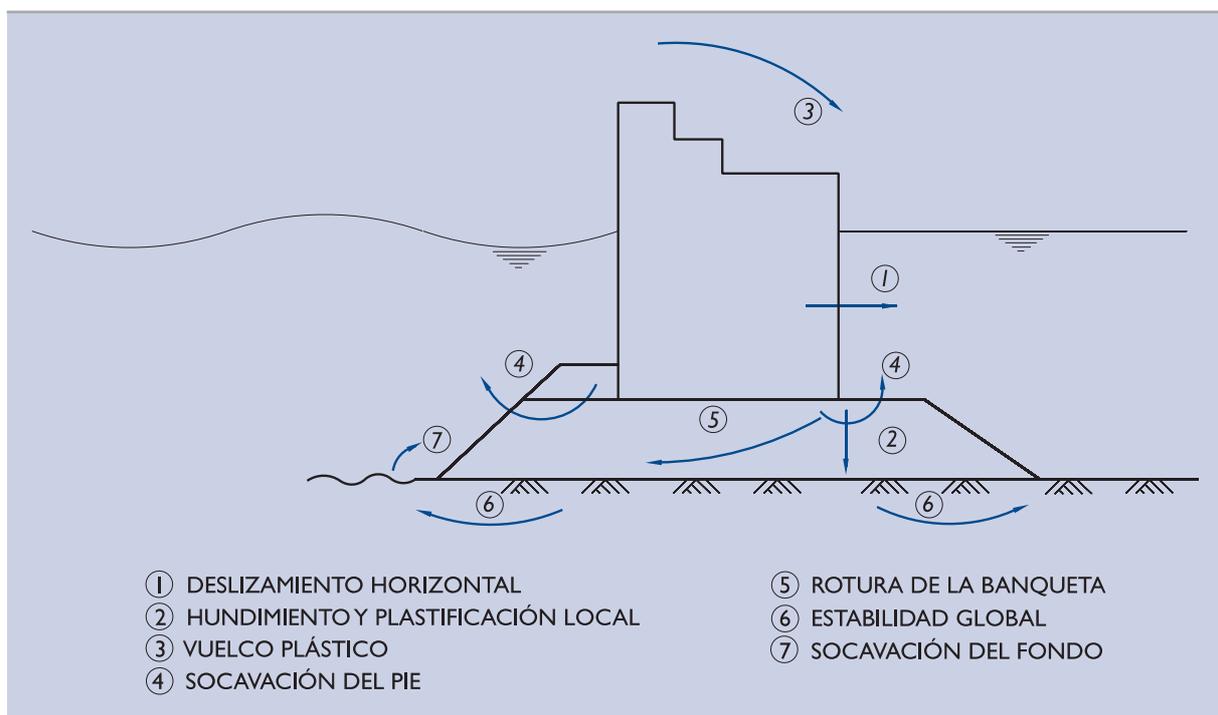
El cálculo de asientos diferidos, que ocurren después de la construcción, causados por la deformación del terreno natural, debe realizarse aplicando los procedimientos adecuados de la mecánica del suelo.

En el apartado 4.7.2.2 se indican algunas causas de asientos diferidos provocados por la compresión de las escolleras.

4.7.5 Diques verticales

Los diques de abrigo verticales tienen unas formas de rotura (modos de fallo) que son específicas de este tipo de obras. En este apartado se analizan aquellos modos de fallo de tipo geotécnico adscritos a Estados Límite Últimos que son más importantes y que, en todo caso, deben considerarse en el proyecto. Ver Fig. 4.7.10.

Figura 4.7.10. Modos de fallo geotécnicos adscritos a Estados Límite Últimos, asociados a los diques de abrigo verticales



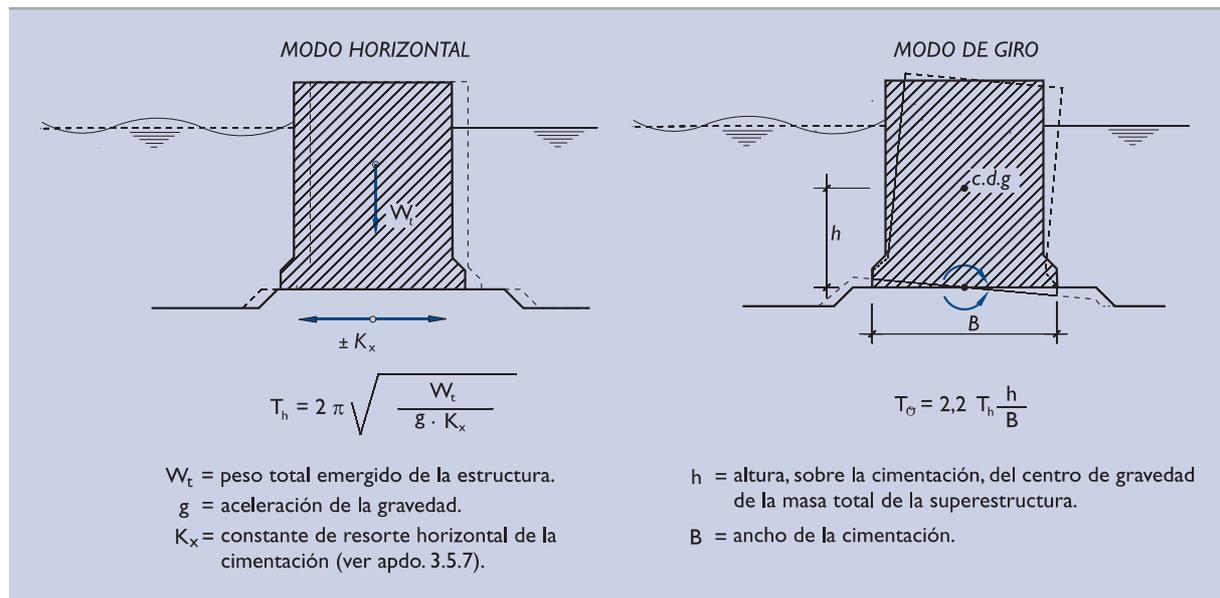
Para la verificación de la seguridad de los diques de abrigo verticales frente a los modos de fallo geotécnicos, la acción variable predominante es la debida a la acción del oleaje y demás oscilaciones del mar. Los valores característicos, de cálculo y de combinación de dicha acción se pueden obtener a partir de los criterios definidos en el apartado 4.7.3.2.

Los empujes sobre la estructura o cuerpo central del dique y las subpresiones en su cimentación, así como las acciones transmitidas a la banqueta de cimentación y las presiones intersticiales generadas tanto en la banqueta como en el terreno natural por el temporal de cálculo, son de difícil evaluación, siendo necesarios cálculos dinámicos específicos del conjunto suelo-estructura al ser solicitado por dicha acción o, simplificada, otros procedimientos empíricos equivalentes de carácter estático de validez reconocida, los cuales deben contrastarse para cada caso concreto por medio de ensayos en modelo físico. Todos estos aspectos se desarrollan más detalladamente en la ROM 1.1, incluyéndose algunas recomendaciones específicas en el apartado 3.10- Efectos dinámicos, de esta Recomendación, en razón del carácter cíclico de la acción del oleaje y de la posibilidad de que pueda producirse un comportamiento dinámico significativo en algunos diques verticales.

El comportamiento dinámico de los diques de abrigo verticales depende del periodo y de la magnitud de la acción del oleaje y, especialmente, de la respuesta del conjunto suelo-estructura o movimiento del mismo al ser solicitado por dicha acción. De acuerdo con lo señalado en el apartado 3.10.3.1 es particularmente significativo cuando la acción debida al oleaje tenga un periodo próximo a alguno de los periodos naturales de oscilación del conjunto suelo-estructura. En estos casos son esperables importantes amplificaciones dinámicas de las cargas transmitidas a la cimentación.

A falta de una mejor aproximación, los periodos naturales de oscilación de los diques verticales correspondientes a los modos fundamentales en la dirección de actuación de la acción pueden estimarse a través de la formulación incluida en la Fig. 4.7.11.

Figura 4.7.11. Periodos naturales de oscilación de los diques verticales correspondientes a los modos fundamentales



Para la estimación de los periodos naturales de oscilación mediante la formulación de dicha figura se considerará el comportamiento deformacional del terreno bajo cargas dinámicas. En este sentido, para la definición de K_x se tomará en consideración las variaciones que se producen en el valor de los parámetros que definen el comportamiento del suelo bajo cargas dinámicas, sobre las cuales se dan recomendaciones en el apartado 3.10 de esta Recomendación.

En general, los diques de abrigo verticales suelen tener periodos naturales de oscilación en el rango entre 0,2 y 2 segundos, muy alejados de los periodos del oleaje y demás oscilaciones del mar. Por el contrario, son muy próximos a los correspondientes a la respuesta de la estructura frente a la acción impulsiva asociada a la actua-

ción de oleajes en condiciones de rotura, por lo que únicamente en estos casos son esperables comportamientos dinámicos significativos de los diques de abrigo verticales.

La estructura de paramento vertical que conforma el dique exigirá una preparación del cimientado adecuada. En aquellos casos en los que la estructura sea de gravedad y de tipología similar a las descritas en esta ROM para los muelles (apartados 4.2 y 4.4), se deben aplicar las recomendaciones que se hacen en esos apartados, así como las del apartado 4.9 relativas a dragados y rellenos bajo estructuras.

Dado el carácter cíclico e impulsivo de las cargas sobre el cimientado en este tipo de estructuras, cualquier tipo de terreno especialmente sensible a la alternancia de cargas, tal como se indica en 3.10, y que pudiera quedar bajo el cimientado, debe ser sustituido o mejorado.

4.7.5.1 Verificación de la seguridad frente al deslizamiento horizontal de la estructura

El deslizamiento de las estructuras de gravedad, a lo largo de su plano de contacto con el terreno natural o con la banqueta de enrase, debe analizarse siguiendo los criterios generales comunes a todas las obras (apartado 3.5- Cimentaciones superficiales), así como las recomendaciones concretas que se indiquen en esta ROM para estructuras similares a las que formen el cuerpo central del dique (apartado 4.2- Muelles de gravedad). No obstante los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán los definidos en la Tabla 4.7.2.

4.7.5.2 Verificación de la seguridad frente al hundimiento, la plastificación local y el vuelco plástico

Las cargas que actúan sobre el cimientado provocarán tensiones puntuales en el contacto de la superestructura con la banqueta de enrase, cuyos máximos estarán situados en las proximidades de los pies de la estructura (lado puerto y lado mar). Esas tensiones pueden provocar la plastificación local de la escollera y, por ese motivo, deben limitarse tal como se indica en 4.2.5.

El hundimiento y el vuelco plástico podrá verificarse siguiendo las recomendaciones generales indicadas en esta ROM 0.5 (apartados 3.5.4, 3.5.6 y 3.7.11.1.2) y aquéllas otras de carácter particular indicadas en la Parte 4 para estructuras portuarias similares, introduciendo los efectos de las presiones intersticiales adicionales generadas por la acción dinámica del oleaje. En estos casos los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán los definidos en la Tabla 4.7.2.

Tabla 4.7.2. Coeficientes de seguridad mínimos para diques verticales (con probabilidad de ocurrencia en el modo de fallo del orden de 0,01)

Apartado donde se define el método de cálculo asociado	Estados Límite Últimos de rotura de tipo geotécnico* (GEO)	Tipos de combinación		
		Cuasi-Permanentes, F_1	Fundamentales o Características, F_2	Accidentales o Sísmicas, F_3
3.5.5	Deslizamiento en el contacto hormigón-banqueta de apoyo	1,3	1,1	1
3.5.4	Hundimiento	1,8	1,5	1,2
3.5.6 y 3.7.11.1.2	Vuelco plástico	1,3	1,2	1,1
3.8	Estabilidad global	1,3	1,1	1
–	Erosiones y socavaciones	MP	MP	MP

* Son los controlados, principalmente, por la resistencia del terreno.

MP En estos casos la seguridad no suele ser cuantificada. El problema puede evitarse tomando medidas preventivas adecuadas (MP).

Nota 1: Antes de utilizar estos coeficientes de seguridad deben conocerse los métodos de cálculo asociados que se definen en esta ROM y que quedan descritos en este apartado 4.7 y en los apartados que se indican en la primera columna.

Nota 2: Estos coeficientes de seguridad son válidos siempre que la probabilidad de ocurrencia admitida para cada modo de fallo sea del orden de 0,01 y se aplique el método estándar de verificación establecido en esta ROM (Ver apartado 4.7.3). Para otras probabilidades de fallo, los coeficientes de seguridad mínimos fijados en esta tabla deberán modificarse de acuerdo con los criterios establecidos en los apartados 3.3.8 y 3.3.10 de esta ROM.

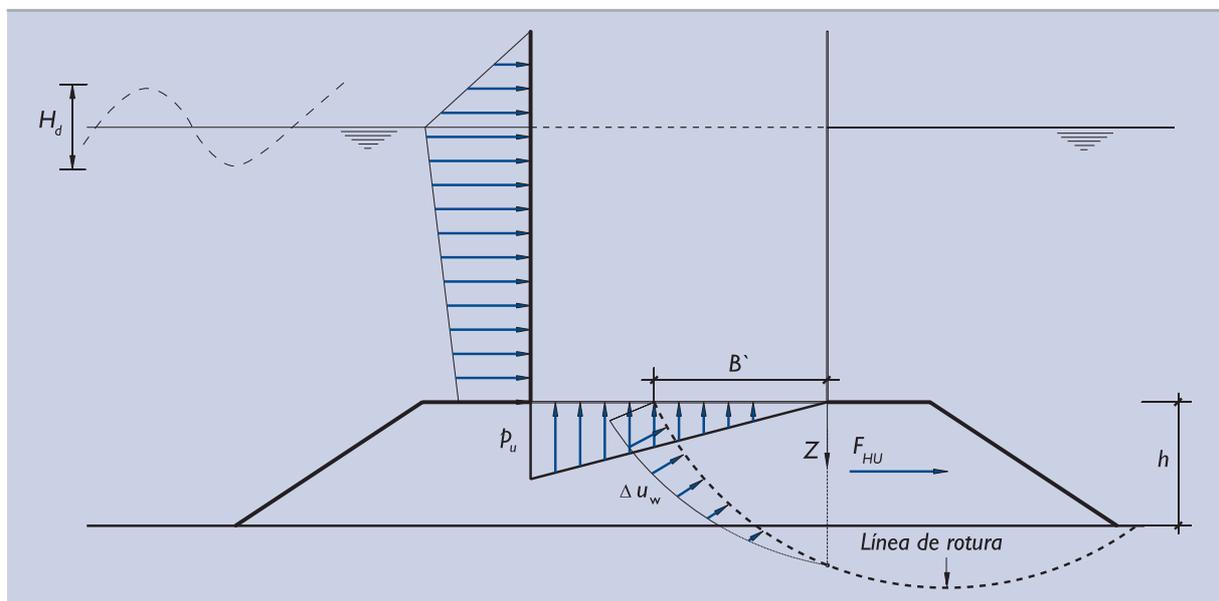
Nota 3: En aquellos casos en que el procedimiento de verificación elegido sea el específico por ser la probabilidad de fallo considerada mayor o igual a 0,05, los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán obtenidos a partir de la formulación incluida en el apartado 4.7.3.2.

No obstante, el efecto de las presiones intersticiales generadas por la acción dinámica del oleaje en los cálculos de los coeficientes de seguridad frente a hundimiento o vuelco plástico de cimentaciones sobre banquetas o materiales granulares es de difícil consideración a través de dicha metodología. Por dichas razones, generalmente es más riguroso tratarlo con modelos numéricos adecuados o equiparar estos modos de fallo a modos de fallo de estabilidad parcial (forma de rotura específicas) y utilizar los métodos descritos en el apartado 3.8 de esta ROM, introduciendo en los cálculos las presiones intersticiales generadas a lo largo de la línea de rotura, considerando como situaciones estáticas equivalentes no únicamente las situaciones de paso de cresta y de seno de la ola, sino otras intermedias, con nivel del mar correspondiente tanto a marea alta como a marea baja. Para la obtención de las leyes de distribución de las presiones intersticiales generadas por la acción cíclica o impulsiva del oleaje y otras oscilaciones del mar, en función de cuál sea el modelo de comportamiento del conjunto estructura, banqueta y terreno natural frente a dicha acción, se incluyen algunas recomendaciones en los apartados 3.4 y 3.10 de esta Recomendación, así como en la ROM I.1.

En el caso de banquetas muy permeables y de pequeño espesor en relación con el cuerpo central del dique, puede considerarse que las presiones intersticiales que se generan en la banqueta por la acción del oleaje cambian poco en vertical. Por dicha razón, cuando se aproximen los empujes y las subpresiones sobre el dique por medio de formulaciones adecuadas de validez reconocida, la ley de distribución de las presiones intersticiales a lo largo de la línea de rotura podrá estimarse a partir de dichas leyes de subpresiones dinámicas. (Ver Fig. 4.7.12).

Si, en cualquier caso, se utilizan los procedimientos simplificados de análisis del hundimiento y del vuelco incluidos en esta Recomendación, el efecto de las presiones intersticiales podrá considerarse aproximadamente mediante la adición a las cargas que actúan sobre el cimiento de una fuerza horizontal, F_{HU} , resultante de las presiones intersticiales generadas por el oleaje a lo largo de la línea de rotura en cada situación de proyecto considerada. (Ver Fig. 4.7.12). Simplificadamente, esta carga horizontal podrá considerarse aplicada al nivel del plano de cimentación.

Figura 4.7.12. Consideración de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en la banqueta y el terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad (Hundimiento y vuelco)



$$F_{HU} = \int_0^h \Delta u_w \cdot dz$$

El cambio de comportamiento del cimiento por la acción dinámica del oleaje, desde una situación drenada a no drenada, con el consiguiente incremento adicional de las presiones intersticiales, puede ser especialmente significativo en cajones cimentados en terrenos naturales formados por arenas finas limosas. Sin embargo, este efec-

to no es significativo en las gravas y en las escolleras de las banquetas. En el todo-uno del interior de las banquetas este extremo debe confirmarse en cada caso concreto.

En los suelos granulares cuya densidad relativa sea superior al 80% y en aquellos suelos cohesivos firmes ($q_u > 0,1$ MPa) que tengan más del 35% de finos (pasante por el tamiz 0,080 UNE) no será necesario tener en cuenta el exceso de presión intersticial debido al carácter dinámico de las acciones del oleaje.

Para la consideración de los parámetros resistentes del cimiento a utilizar en los cálculos de verificación de la seguridad frente al vuelco y al hundimiento se tendrá en cuenta el comportamiento drenado o no drenado del mismo frente a la acción del oleaje. En el caso de suelos cohesivos o poco permeables, se deberá considerar también el grado de consolidación alcanzado en el momento correspondiente a la situación de proyecto planteada. En este sentido son aplicables las recomendaciones indicadas en 4.7.4.5.

4.7.5.3 Verificación de la seguridad frente a la pérdida de la estabilidad global

El equilibrio global de los diques de abrigo deberá comprobarse siempre que bajo su cimentación existan suelos o rocas alteradas poco resistentes. Los principios generales de cálculo serán los indicados en el apartado 3.8 de esta ROM, introduciendo en los cálculos las presiones intersticiales generadas a lo largo de la línea de rotura por la acción dinámica del oleaje y demás oscilaciones del mar, considerando como situaciones estáticas equivalentes las situaciones de paso de cresta y de seno de la ola, con nivel del mar correspondiente tanto a marea alta como a marea baja. Para la obtención de las leyes de distribución de las presiones intersticiales generadas por la acción cíclica o impulsiva del oleaje y otras oscilaciones del mar, en función de cuál sea el comportamiento drenado o no drenado del terreno natural frente a dicha acción, se incluyen algunas recomendaciones en los apartados 3.4 y 3.10 de esta Recomendación, dedicado a los efectos dinámicos, las cuales se detallarán en la ROM I.1.

En la Fig. 4.7.13 se representan esquemáticamente las leyes exceso de presiones intersticiales sobre los valores hidrostáticos a considerar a lo largo de la línea de rotura.

En el caso de banquetas muy permeables y de pequeño espesor, podrá considerarse que las presiones intersticiales que se generan en la banqueta por acción del oleaje cambian poco en vertical. Por dicha razón, cuando se aproximen los empujes y las subpresiones sobre el cuerpo central del dique por medio de formulaciones adecuadas de validez reconocida, la ley de distribución de las presiones intersticiales a lo largo del tramo de la línea de rotura incluido en la banqueta podrá estimarse simplificada a partir de dichas leyes de subpresiones dinámicas (ver Fig. 4.7.12).

Estos excesos de presión intersticial pueden considerarse en los cálculos directamente o sustituirlos por las fuerzas de arrastre que producen el efecto equivalente. Ver apartado 3.4.5.

4.7.5.4 Verificación de la seguridad frente a socavaciones y erosiones

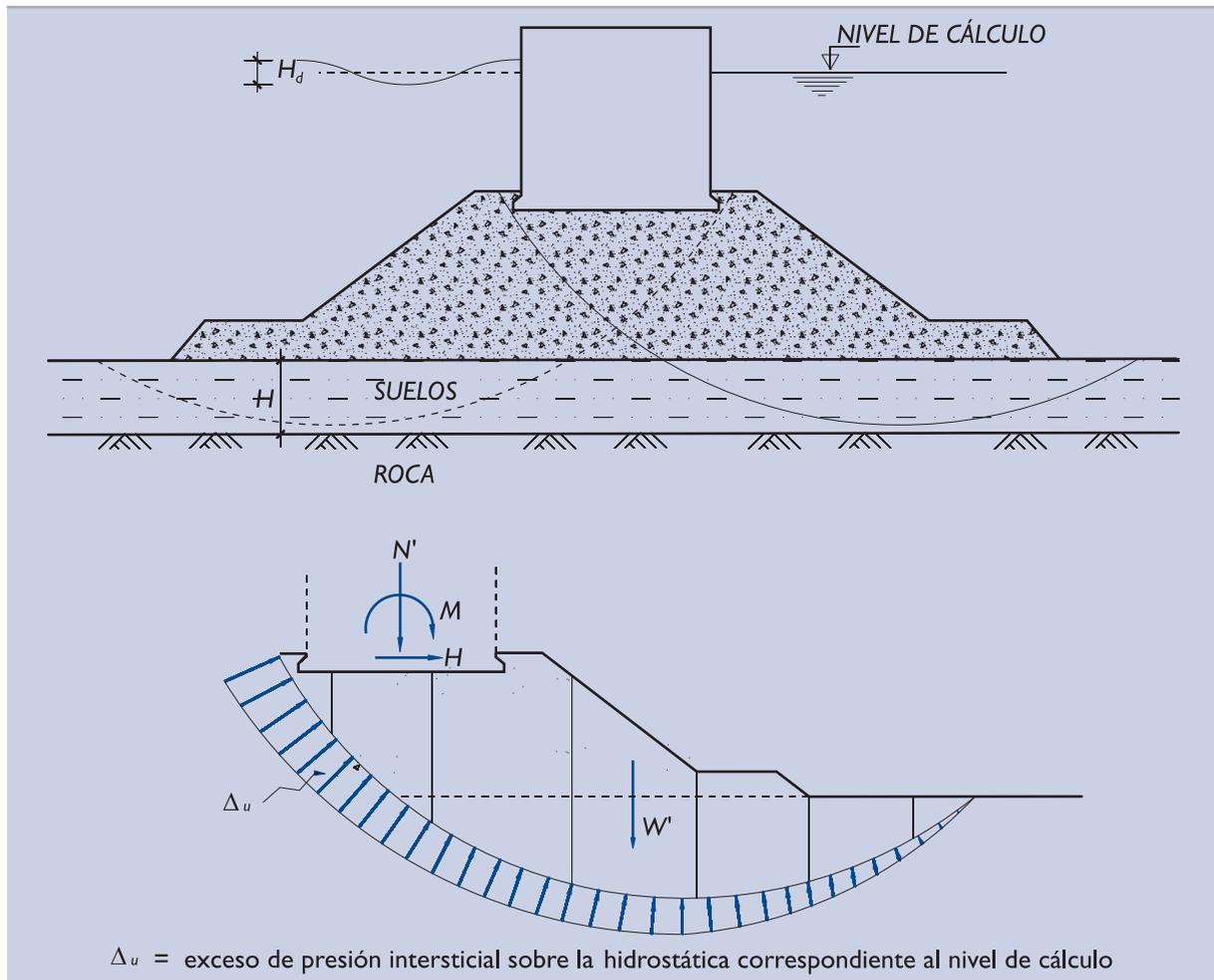
Las socavaciones del lecho del fondo marino que pueden producir las corrientes de agua, modificadas por la presencia del dique, así como por el oleaje, son un aspecto de gran interés. Las observaciones hechas en el apartado 4.7.4.8 son aplicables a este caso.

Las consecuencias de la erosión en el entorno del pie, o en la posible banqueta de apoyo de los diques verticales, pueden ser graves, ya que en caso de descalzarse la estructura se produciría una situación de difícil reparación. En la ROM I.1 se desarrollará más ampliamente la verificación de la seguridad frente a este modo de fallo.

4.7.5.5 Asientos y deformaciones

La posible rigidez de la estructura del dique y el carácter alternativo de las acciones implicadas hacen que exista cierto riesgo de que el dique sobrepase un estado último de servicio debido a las deformaciones.

Figura 4.7.13. Consideración de las presiones intersticiales generadas por el oleaje en el interior de la banqueta y del terreno natural a los efectos de la verificación de la seguridad frente a la pérdida de estabilidad global



El cálculo de asientos del dique puede hacerse por los procedimientos convencionales de la mecánica del suelo, aunque al definir los módulos de deformación es necesario tener en cuenta, al menos de una manera indirecta, el carácter cíclico de las cargas que puede inducir cierta densificación y, por lo tanto, cierto asiento.

La banqueta de escollera puede ser causa de asientos postconstructivos de cierta importancia. Ver apartado 4.7.4.10, dedicado a los asientos de los diques en talud.

El cálculo de los desplazamientos horizontales y de los giros (o cabeceos) producidos por los empujes cíclicos del agua puede hacerse con las fórmulas estáticas de la teoría de la elasticidad y utilizando módulos de deformación que tengan en cuenta ese efecto cíclico de las cargas.

En aquellos casos en que el dique tenga una respuesta dinámica significativa, los cálculos de deformaciones pueden requerir el uso de procedimientos más complejos de cálculo dinámico. Ver apartado 3.10.

4.7.5.6 Coeficientes de seguridad mínimos

Los coeficientes de seguridad mínimos que deben exigirse deben ser acordes con la definición de las acciones que se haya usado para su cálculo y con las probabilidades de fallo admitida.

Los coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a cada uno de los modos de fallo considerados en los apartados precedentes se resumen en la Tabla 4.7.2. Estos coeficientes son válidos cuando la probabilidad de ocurrencia admitida para este modo de fallo sea del orden de 0,01 y se considere el método estándar de verificación establecidos en esta ROM. Para otras probabilidades de fallo, los coeficientes de seguridad mínimos fijados en esta tabla deberán modificarse de acuerdo con los criterios establecidos en esta ROM (Ver apartado 3.3.8 y 3.3.10). A su vez, en aquellos casos en los que el procedimiento de verificación elegido sea el específico por ser la probabilidad de fallo considerada mayor o igual a 0,05, los coeficientes de seguridad mínimos exigidos serán obtenidos a partir de la formulación incluida en el apartado 4.7.3.2.

Estos coeficientes de seguridad son válidos únicamente para el método de cálculo indicado en la tabla. El ingeniero puede justificar en su proyecto la utilización de otros procedimientos de cálculo y de otros requisitos de seguridad asociados.

4.8 PLATAFORMAS MARINAS (OFF-SHORE)

Las construcciones marinas en zonas de grandes profundidades tienen aspectos singulares respecto a otras construcciones costeras. Entre otros, cabe destacar:

- ◆ Importancia decisiva de la acción del oleaje y del viento respecto a otras acciones.
- ◆ Excentricidad elevada de las acciones horizontales respecto al plano de sustentación.
- ◆ Carácter dinámico de las acciones.
- ◆ Coste muy superior de los reconocimientos geotécnicos.

Las técnicas de construcción y los métodos de proyecto de estas estructuras exigen la consideración de ciertos temas específicos. A continuación se indican los problemas más importantes que deben abordarse en el proyecto desde el punto de vista geotécnico.

4.8.1 Tipologías

Los tipos de plataformas marinas que se suelen construir son muy variados; en la Fig. 4.8.1 se indican esquemáticamente algunas de las tipologías de plataformas construidas.

Las **plataformas izadas** (jack-up rigs) son estructuras flotantes con grandes patas (al menos tres) que pueden subirse o bajarse. Son remolcadas al emplazamiento con las patas retraídas y, una vez en él, las bajan para apoyarlas en el fondo. La estructura flotante se iza sobre las patas e incluso se sobrecarga, con un lastre temporal de agua, para provocar la hinca de las patas en los sedimentos del fondo.

Las **plataformas pilotadas**, típicas del golfo de México, son estructuras metálicas de celosía espacial que se apoyan en el fondo mediante pilotes hincados.

En las construcciones europeas del Mar del Norte, son usuales las **plataformas de gravedad** cimentadas superficialmente.

Se construyen, también, **plataformas flotantes ancladas** al fondo mediante tirantes (estructuras tubulares de acero) que a su vez transmiten la carga al terreno mediante pilotes sometidos a tracción. Existen otros sistemas de anclaje.

Más recientemente se piensa en la construcción de estructuras ligeras similares a las torres metálicas, apoyadas en el fondo y sujetas con vientos (tirantes laterales anclados al terreno). Ofrecen la ventaja de una gran flexibilidad y, por lo tanto, una menor intensidad de esfuerzos transmitidos al terreno.

A efectos de establecer las recomendaciones geotécnicas que siguen se distinguirán dos tipologías básicas de cimentación: la cimentación superficial y la cimentación profunda.

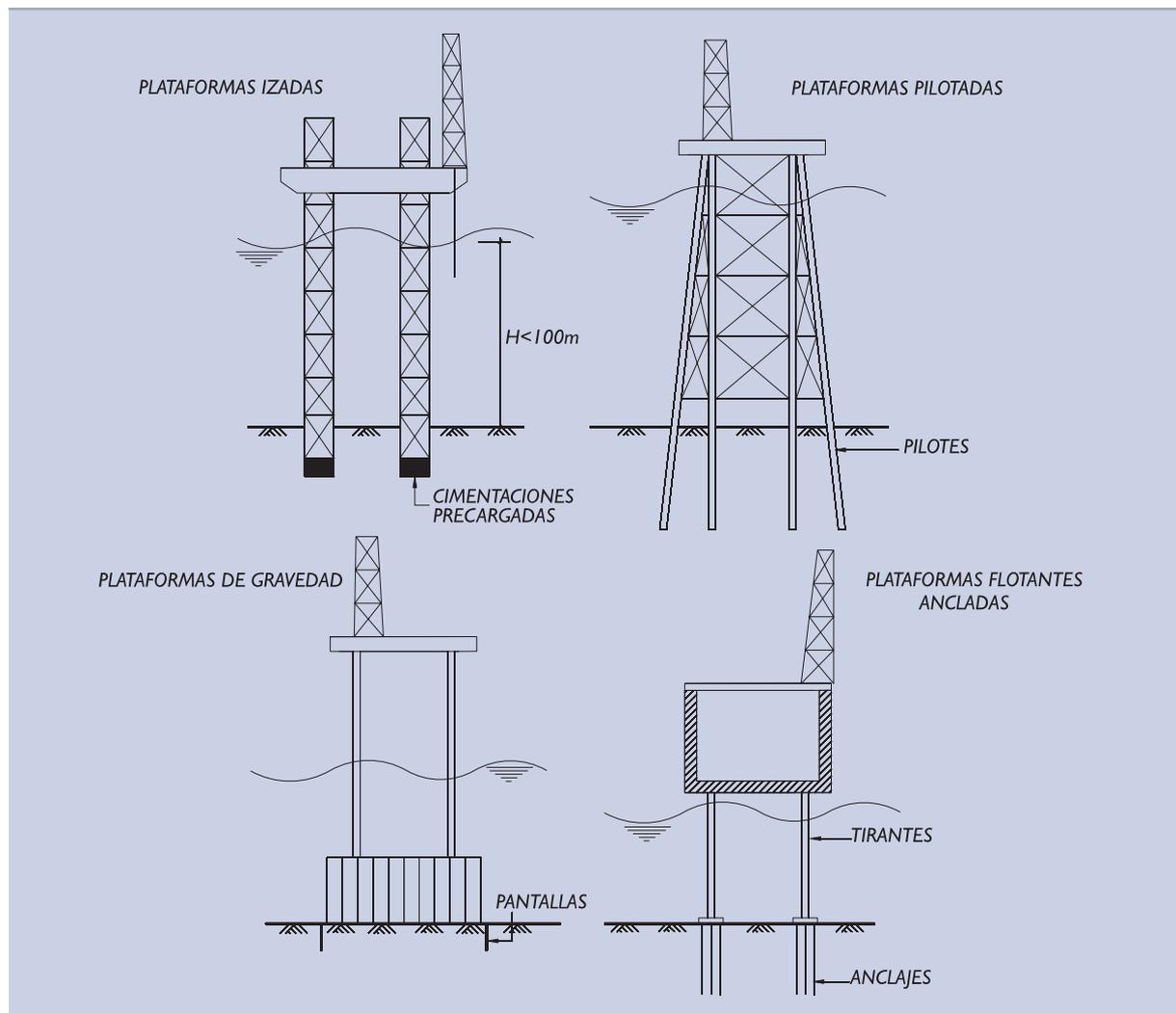
Las plataformas izadas tienen un tipo de cimentación en cierto modo intermedia. En la base de sus patas tienen unas zapatas de formas especiales que se hunden en el terreno hasta cierta profundidad. Las técnicas de análisis de la seguridad de estas cimentaciones están lejos de ser convencionales y se consideran fuera del alcance de esta ROM.

4.8.2 Acciones del oleaje y del viento

La acción principal sobre una plataforma marina es la debida al oleaje actuando sobre el sistema de soporte de la plataforma y al viento actuando sobre la superestructura.

Estas acciones tienen un carácter dinámico evidente, de manera que, para realizar cálculos geotécnicos de comprobación de los Estados Límite Últimos, es necesario, en caso de utilizarse procedimientos de cálculo estáticos equivalentes, afectar a las amplitudes de las acciones por ciertos factores dinámicos de carga.

Figura 4.8.1. Tipologías de plataformas marinas (Off-Shore)



Esos factores dependen del espectro de energía de las acciones y del período y amortiguamiento de la respuesta de la estructura. La solución de este problema de interacción se escapa al ámbito de esta ROM.

4.8.3 Reconocimientos geotécnicos

El reconocimiento geotécnico del fondo, en los lugares de construcción de las plataformas marinas, está encaminado, como en todos los demás casos, a conocer la estructura del terreno y sus propiedades mecánicas. La realización de las campañas de reconocimiento asociadas al estudio de las plataformas marinas presenta, sin embargo, ciertas singularidades. Entre ellas:

- ◆ Grandes calados y emplazamientos expuestos, lo que requiere utilizar equipos especiales.
- ◆ Profundidades de investigación elevadas (100-150 m para pilotes, 100 m para plataformas de gravedad).
- ◆ Costes elevados de la investigación, que se suele estructurar en dos fases. En general, antes de utilizar procedimientos directos de reconocimiento, se utilizan procedimientos geofísicos, principalmente la sísmica de reflexión.
- ◆ Dificultad de asegurar el posicionamiento del punto ensayado.
- ◆ Dificultad de obtener muestras de calidad (sistema de perforación, cambios muy fuertes en la presión hidrostática entre el punto de toma de la muestra y la superficie, etc.).
- ◆ Dificultad de acceder a un laboratorio. Conveniencia de disponer de un laboratorio de suelos en la embarcación de reconocimiento.

Los reconocimientos directos suelen estar basados en los mismos principios generales que los correspondientes a zonas del litoral. Esto es, requieren la ejecución de sondeos y la toma de muestras, en este caso con equipos situados en el fondo y operados desde la superficie mediante embarcaciones especiales.

Los ensayos in situ más frecuentes son los de penetración estática (piezocono), los presiométricos, el ensayo de molinete, etc. Estos ensayos están descritos en la Parte 2 de esta ROM.

El aspecto del comportamiento dinámico de los suelos del fondo es, en general, más significativo que en la mayor parte de las obras portuarias. Los ensayos dinámicos más usuales están descritos en la Parte 2 de esta ROM y las características que se deducen de ellos se comentan en el apartado 3.10.

4.8.4 Estabilidad del fondo

Los fondos marinos pueden sufrir inestabilidades por causas muy variadas, entre otras:

- ◆ Corrientes marinas.
- ◆ Licuefacción causada por las tensiones de corte cíclicas inducidas por el movimiento del agua en el fondo.
- ◆ Inestabilidades causadas por sobrecargas de sedimentos en zonas de aluviones fluviales.
- ◆ Licuefacción causada por terremotos.

La inestabilidad del fondo marino puede provocar deslizamientos en zonas prácticamente llanas (se han observado algunos en zona con pendientes tan bajas como el 2%) y pueden afectar a grandes profundidades dentro de los sedimentos (se conocen deslizamientos que han afectado a más de 40 m de profundidad).

Los tipos de suelos donde suelen producirse deslizamientos son fangos y arenas finas. La amplitud de los corrimientos (distancia de pie a cabeza), y las distancias que pueden moverse estos suelos, son mucho mayores que los que usualmente se observan en tierra. La construcción de plataformas marinas en zonas de fondo inestable es siempre difícil y arriesgada, de manera que buena parte de los esfuerzos del reconocimiento general del entorno de la plataforma (topografía y geofísica) debe encaminarse a asegurar que la zona en cuestión es naturalmente estable.

4.8.5 Cimentaciones superficiales

Las cimentaciones superficiales de las plataformas marinas pueden ser de formas muy variadas. La que se considera aquí estaría formada por un gran área de apoyo, con dimensiones similares (usualmente algo menores) al calado.

La cimentación superficial suele hacerse con una preparación mínima o nula de la zona de contacto. El bloque de cimentación suele ser prefabricado en tierra, transportado mediante flotación y fondeado en el lugar de instalación.

Las plataformas de gravedad suelen llevar en su base unas clavijas (dowels) que garantizan la estabilidad de la estructura en las fases primeras de fondeo. Estas clavijas penetran en el terreno en una etapa en la que la plataforma aún tiene movimientos debidos a las acciones externas, oleaje principalmente, y consiguen una estabilidad provisional.

Las cimentaciones superficiales suelen estar protegidas lateralmente mediante pantallas (metálicas o de hormigón armado u otros elementos similares) que se hincan tras el fondeo. De esta forma, los bordes, que generalmente han de soportar mayores tensiones, tienen cierto confinamiento lateral. Estos elementos de protección (skirts) también colaboran de forma notable en la resistencia de la cimentación al deslizamiento.

El confinamiento conseguido con las pantallas laterales permite hacer, a posteriori, tratamientos de inyección para mejorar el terreno y consolidar el contacto del terreno con la estructura de cimentación.

Las tensiones verticales que transmiten las plataformas marinas de gravedad, cimentadas superficialmente, son moderadas y no mayores que las de otras obras portuarias de calados mucho más pequeños.

El carácter dinámico de las cargas y el hecho de no poder preparar debidamente los fondos hacen que las cimentaciones directas queden limitadas a condiciones de suelos firmes, esto es, suelos arenosos densos y suelos arcillosos sobreconsolidados.

Los Estados Límite de las cimentaciones superficiales de las plataformas marinas son, en buena parte, comunes con otras cimentaciones superficiales descritas en esta ROM.

Entre los temas que deben ser considerados, deben citarse los siguientes:

- ◆ Estabilidad horizontal en las condiciones más desfavorables.
- ◆ Estabilidad al vuelco por fallo del cimiento en las condiciones más desfavorables.
- ◆ Estabilidad al vuelco y al deslizamiento en condiciones de carga cíclica.
- ◆ Deformabilidad horizontal y vertical con cargas cíclicas.
- ◆ Determinación de las máximas presiones de contacto en la base, tomando en consideración las irregularidades del fondo.
- ◆ Verificación de las condiciones de no resonancia con las acciones exteriores.
- ◆ Verificación de la erosión en el entorno de la estructura.
- ◆ Determinación del comportamiento de las pantallas (skirt) para incrementar la resistencia del terreno y prevenir las erosiones.

Los problemas de estabilidad deben comprobarse también en fase de fondeo. Esas comprobaciones permitirán un proyecto adecuado del sistema de soporte temporal mediante las clavijas (dowels).

En los párrafos que siguen se hacen algunas observaciones específicas sobre los Estados Límite Últimos de estas plataformas, considerando únicamente algunos de los que están controlados, principalmente, por las características del terreno.

4.8.5.1 Análisis estático

Los Estados Límite Últimos de estas cimentaciones suelen producirse por causa del oleaje y del viento, que producen en la cimentación una historia temporal de reacciones.

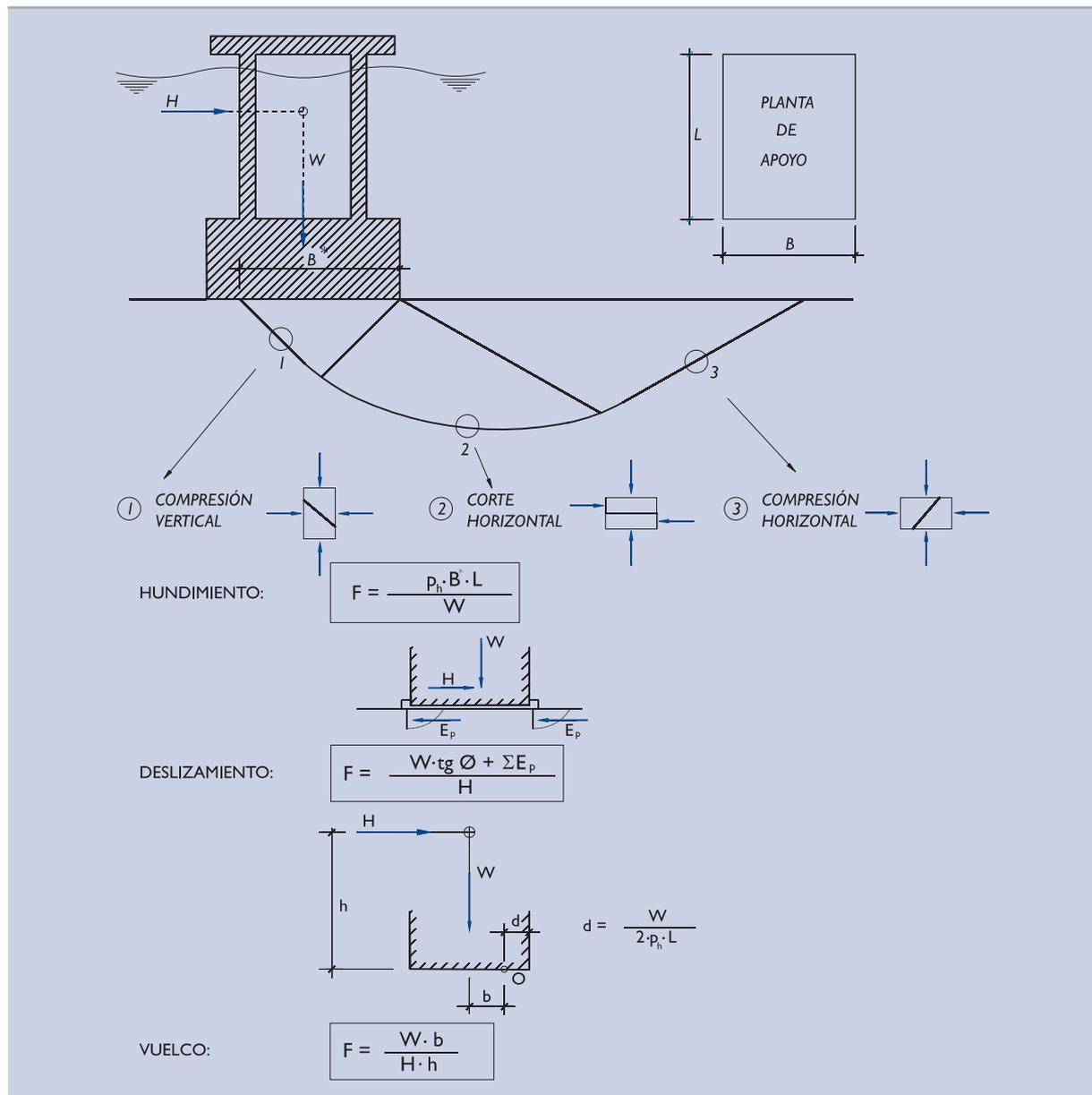
El análisis de los Estados Límite Últimos puede realizarse de dos formas bien distintas que, únicamente a efectos de estas recomendaciones, se denominarán análisis estático, que se considera en este apartado, y análisis dinámico, que se considera en el apartado que sigue.

La hipótesis básica de este método estriba en representar el temporal de cálculo que puede producir el Estado Límite mediante una acción estática equivalente sobre la cimentación. Esta acción puede considerarse producida por la ola máxima del temporal o por otra que pueda representar mejor, como efecto único, el temporal de cálculo. Las acciones dinámicas, en cualquier caso, quedan representadas por unas fuerzas estáticas equivalentes.

Este método tiene una justificación basada en la experiencia actual sobre el comportamiento de los suelos firmes en los que se suelen cimentar superficialmente las plataformas de gravedad. La resistencia al corte de estos suelos, ante una ola máxima, es independiente del paso previo de otras olas. Esto es cierto siempre que se esté lejos de la rotura, es decir, siempre que los coeficientes de seguridad, que se obtengan por este procedimiento, sean altos.

Una vez conocidos los esfuerzos, se puede conocer la excentricidad de la resultante y su inclinación y así proceder con los procedimientos de análisis de la seguridad frente al hundimiento, vuelco y deslizamiento o al estudio de deformaciones. En la Fig. 4.8.2 se indican esquemáticamente los modos de fallo típicos de estas cimentaciones.

Figura 4.8.2. Modos de fallo típicos de plataformas de gravedad



En el mecanismo de deslizamiento horizontal se debe contar con el empuje pasivo de todas las pantallas siempre que esto no suponga una seguridad mayor que la correspondiente a un deslizamiento más profundo, por debajo de sus puntas, y siempre que las pantallas tengan resistencia estructural suficiente para transmitir los esfuerzos correspondientes.

Los parámetros resistentes a utilizar en estos cálculos (deslizamiento, hundimiento y vuelco) tienen, sin embargo, cierta diferencia respecto a los usualmente empleados.

Los parámetros resistentes deben obtenerse teniendo en cuenta este efecto, tal como se indica en el punto 3.10, debido al carácter dinámico de las acciones.

En las arcillas firmes y en los suelos granulares densos, esa resistencia dinámica puede ser incluso mayor que la resistencia al corte estática, ya que las cargas cíclicas pueden producir descensos de la presión intersticial. En otros suelos menos firmes este extremo debe confirmarse.

En general será aceptable, por lo tanto, calcular los Estados Límite Últimos de rotura con los parámetros usuales en presiones efectivas, pero será necesario comprobar, con algunos ensayos específicos, que las variaciones de presión intersticial, durante el temporal de cálculo, son negativas; de otro modo habrá que reducir la resistencia para considerar ese efecto.

Debe tenerse en cuenta, además, que la resistencia del terreno depende también de la forma en que se carguen las muestras (compresión vertical, corte simple o compresión horizontal, según se indica en la Fig. 4.8.2).

Los procedimientos de cálculo y los valores mínimos exigibles de los coeficientes de seguridad calculados mediante este análisis estático son similares a los descritos para las cimentaciones superficiales convencionales (apartado 3.5), siempre que sea posible admitir probabilidades de fallo del mismo orden de magnitud. La singularidad de estas obras, sin embargo, puede justificar que sea conveniente considerar otras probabilidades de fallo y, por tanto, otros requisitos mínimos de seguridad frente a estos Estados Límite Últimos. En estos casos, dado que las acciones variables predominantes (oleaje y viento) son las debidas al temporal de cálculo, podrá simplificarmente seguirse el proceso específico que se señala en el apartado 4.7-Diques de abrigo.

Conviene destacar, además, otro modo de fallo típico que se refiere a la plastificación local del terreno en el entorno de la punta de las pantallas de confinamiento lateral. Este modo de fallo puede analizarse por el procedimiento de evaluación que se describe en el apartado 4.5.3.5.

Para el cálculo de las deformaciones máximas producidas durante el temporal de cálculo pueden seguirse los procedimientos indicados en el apartado 3.5.7, utilizando los módulos dinámicos descritos en el apartado 3.10. De acuerdo con dicho apartado, debe hacerse también la consideración debida al fenómeno de densificación.

4.8.5.2 Análisis dinámico

El estudio de las plataformas marinas requiere la realización de análisis dinámicos, no sólo para analizar el comportamiento del cimiento sino también, y principalmente, para conocer los esfuerzos en la estructura.

Los modelos dinámicos que representan al conjunto del terreno y la estructura en estos cálculos pueden ser de dos tipos, según la forma en que representen al terreno. La representación del terreno puede realizarse mediante una serie de resortes y amortiguadores colocados en la base del modelo estructural o mediante una discretización más detallada del terreno, representándolo mediante una malla de elementos finitos. En el apartado 3.10.3 se indican algunos detalles sobre la forma de representar el terreno en esos dos tipos de modelos.

Normalmente, ambos modelos suponen que el comportamiento del terreno es elástico y con un amortiguamiento viscoso equivalente que representa la capacidad de disipación de energía del suelo (que lo hace por radiación y por histéresis).

Ambos tipos de modelos, en las condiciones señaladas, conducen a resultados similares en cuanto a acciones sobre el cimientado o esfuerzos en la estructura. Los modelos de muelles y amortiguadores necesitan, en lo que a estudio del cimientado se refiere, unos cálculos posteriores complementarios que permitan estimar las tensiones, en los distintos puntos del terreno, una vez se conocen las acciones globales sobre cada resorte que representa al terreno de cimentación.

Los resultados de los cálculos con estos modelos permiten conocer, en cualquier caso, las tensiones que existen en cada punto del terreno durante el temporal correspondiente a la situación de proyecto que se analiza.

Para conocer el grado de seguridad de la cimentación de la plataforma, las tensiones obtenidas se comparan con las tensiones que provocarían la rotura del suelo. A efectos de facilitar esa comparación y a efectos de simplificar los ensayos de laboratorio correspondientes, la historia de tensiones suele traducirse a una tensión cíclica de valor medio y amplitud constantes, que actuaría un número fijo de ciclos, determinado de manera que produjera un efecto dinámico equivalente. Existen distintos métodos empíricos para hacer esta equivalencia.

De esta forma se tendría una imagen de la proximidad del suelo a la rotura, en cada zona de la cimentación, cuando actúa el temporal de cálculo. Con esta imagen, el ingeniero puede valorar la probabilidad de fallo de la estructura.

Es posible, también, y así se hace cuando el tema es de importancia, utilizar modelos del suelo más complejos, que representen con más detalle el comportamiento dinámico. Con estos modelos, se pueden obtener, sin cálculos o procesos posteriores, el grado de seguridad en cada punto de la cimentación. Esta alternativa está aún en fase de investigación y no es una práctica rutinaria bien establecida.

4.8.6 Cimentaciones profundas

La transmisión de cargas al terreno, en aquellos fondos marinos formados por suelos blandos, debe realizarse mediante pilotes. Dadas las condiciones de ejecución, los pilotes suelen ser hincados y, generalmente, metálicos.

La estabilidad de la obra estará condicionada por el comportamiento de los pilotes. En ese sentido los Estados Límite que pueden presentarse son iguales que los descritos en el apartado 3.6 de esta ROM que es, a estos efectos, de aplicación.

Los estudios asociados a los pilotajes de las plataformas marinas suelen estar relacionados con los temas siguientes:

- ◆ Estudio de la hinca.
- ◆ Carga de hundimiento.
- ◆ Carga de rotura horizontal.
- ◆ Deformabilidad.
- ◆ Esfuerzos en los pilotes.

Los problemas relativos a la estabilidad del fondo (deslizamientos, erosiones y socavaciones) son comunes con la otra tipología de cimentación (la superficial) y han sido considerados en 4.8.4.

4.8.6.1 Estudio de la hinca

La ejecución de las cimentaciones pilotadas es siempre costosa y por ese motivo su estudio detallado, antes de acometer la obra, es un aspecto del máximo interés.

La profundidad a la que puede hincarse un determinado pilote con un determinado equipo de hinca y la capacidad de carga que corresponde a una determinada longitud de hinca son predecibles con las fórmulas dinámicas de hinca y, preferentemente, mediante la ecuación de la onda (ver apartado 3.6.5).

Si se quiere aumentar la longitud hincada que resulta en un caso determinado se puede recurrir a ciertos procedimientos de ayuda a la hinca (lanzas de agua, perforaciones previas, remoción del tapón de tierras en el interior del pilote, etc.).

Si se quiere, con una determinada longitud de hinca, aumentar la capacidad portante del pilote, es posible realizar ciertas operaciones auxiliares (acampanamiento de la zona de punta y relleno posterior de hormigón, inyecciones de lechada de cemento, etc.).

En general, en la tecnología de los pilotes metálicos hincados, existen multitud de procedimientos para conseguir el máximo aprovechamiento conjunto de la capacidad estructural del pilote y del terreno. El ingeniero debe conocerlas y evaluarlas, en cada caso concreto, durante la Fase de los Estudios de proyecto.

4.8.6.2 Carga de hundimiento

La carga de hundimiento de los pilotes (individuales o en grupo) debe estimarse tal como se indica en el apartado 3.6.6 de esta ROM.

La consideración de los efectos dinámicos (cargas rápidas y alternativas) suele conducir a la conclusión de que la capacidad de carga dinámica es prácticamente igual que la estática salvo en algunas circunstancias excepcionales:

- a. Cuando los efectos dinámicos implican la inversión de la carga, esto es, cuando existen pilotes trabajando alternativamente a tracción y compresión.
- b. Cuando la amplitud de la carga dinámica supera a la mitad (aproximadamente) de la resistencia por fuste.

En todos los casos y particularmente en los casos excepcionales citados, el ingeniero comprobará, vía experiencias previas similares o vía ensayos de carga in situ (a veces pueden hacerse en formaciones de terreno similares, en tierra), el posible efecto dinámico en la reducción de la capacidad portante.

4.8.6.3 Carga de rotura horizontal del terreno

La carga de rotura horizontal del terreno puede estimarse con los procedimientos que se indican en el apartado 3.6.8. En general, este problema sólo será crítico en pilotes poco empotrados en el terreno.

El efecto dinámico, en la carga de rotura horizontal, se suele considerar rebajando la línea del fondo a efectos de cálculo (reducción virtual de la longitud de pilote hincada), para tener en cuenta el huelgo que se puede producir en la superficie del fondo entre el pilote y el terreno.

El ingeniero debe consultar experiencias similares o investigar el efecto en ensayos de campo adecuados. Para estimaciones previas y a falta de mejor información, puede suponerse que, en la resistencia horizontal frente a cargas alternativas, la zona de espesor igual a 1,5 D (vez y media el diámetro del pilote) próxima a la superficie no colabora en el soporte lateral del pilote más que con su peso.

4.8.6.4 Deformabilidad

El carácter alternativo de las cargas hace que los módulos de reacción del terreno, necesarios para estudiar estados límite de deformaciones y para calcular esfuerzos en los pilotes, puedan ser distintos que los correspondientes a sollicitaciones estáticas.

Normalmente el efecto cíclico de las cargas, tanto axiales como transversales, hace que se produzca una cierta degeneración del terreno y que, por ese efecto, el sistema suelo-pilote resulte más flexible.

La rapidez de las cargas hace que la respuesta del terreno sea más rígida que en los casos de carga lenta.

La combinación de ambos hechos hace que, a efectos de estimaciones previas, los parámetros de deformación que se indican en el apartado 3.6.9 resulten razonables. Las constantes de resorte que pueden representar a los pilotes en los cálculos dinámicos podrían estimarse, en una primera aproximación, con las fórmulas de la estática que se indican en ese apartado.

Para cálculos de detalle y, sobre todo, para situaciones excepcionales, como las definidas en a) y b) del apartado 4.8.6.2, será recomendable realizar pruebas de tiro horizontal específicas.

4.8.6.5 Esfuerzos en los pilotes

El cálculo de esfuerzos en los pilotes es, en general, un problema complejo de interacción suelo-estructura. Para realizar esos cálculos, cada pilote puede ser representado por elementos estructurales sujetos a un soporte rígido mediante muelles y amortiguadores.

Las constantes de resorte que se indican en el apartado 3.6.9 pueden ser de utilidad en esos cálculos. En la literatura técnica, existen buen número de publicaciones que pueden orientar al ingeniero en la elección de los parámetros más adecuados para el tipo de cálculo que pretenda realizar, en el proceso de análisis de los Estados Límite Últimos controlados por la resistencia estructural de los pilotes.

4.9 DRAGADOS Y RELLENOS

Aunque los movimientos de tierras en obras marítimas y portuarias serán objeto de Recomendaciones específicas dentro del Programa ROM, se ha considerado conveniente avanzar en esta ROM 0.5, de carácter geotécnico y objetivos generales, algunas recomendaciones que pueden ser útiles para el proyecto y planificación de dragados y rellenos marítimos o portuarios.

4.9.1 Tipos de dragados

Los dragados, según su objetivo principal, pueden ser de los siguientes tipos:

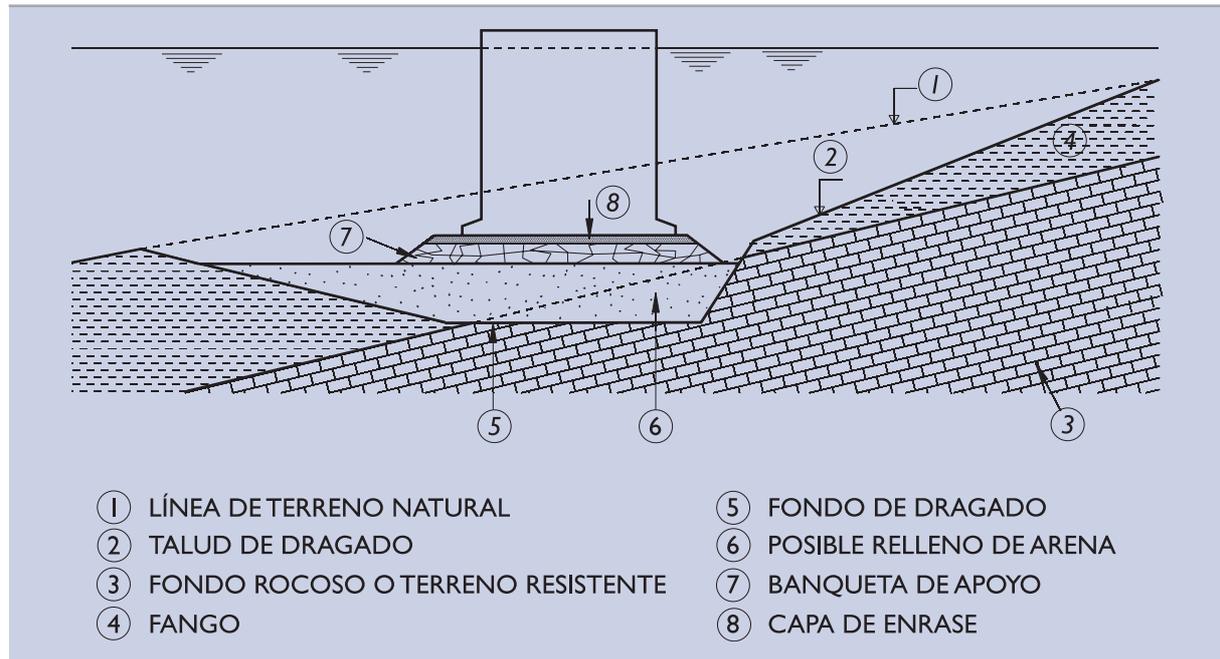
- ◆ Los que tienen como finalidad aumentar el calado o profundidad en dársenas (o áreas de flotación) y canales de navegación.
- ◆ Los dirigidos a la obtención de materiales de préstamo para rellenos portuarios o costeros y regeneración de playas.
- ◆ Los necesarios en la ejecución de estructuras marítimas con objeto de alcanzar suelos de mejor calidad para su cimentación, eliminando los suelos más blandos, o aquellos dragados que constituyen una fase más en el proceso constructivo, como puede ser la retirada de motas y rellenos provisionales. A estos dragados se les denomina aquí “estructurales”.

A su vez, los dragados de los dos primeros tipos pueden ser de primer establecimiento o de mantenimiento, si bien esta clasificación carece de relevancia desde el punto de vista geotécnico.

También se suelen clasificar los dragados de acuerdo con su extensión. Se denominan “dragados generales” aquéllos que afectan a superficies de grandes dimensiones en cualquier dirección en planta y “dragados en zanja” los que afectan a una franja, de mayor o menor anchura. De este segundo tipo suelen ser los dragados estructurales.

En la Fig. 4.9.1 se indica esquemáticamente una obra con dragado de este último tipo.

Figura 4.9.1. Esquema de un dragado en zanja para sustitución de suelos blandos



Nota: El relleno n° 6 puede estar formado por otros materiales granulares adecuados, escollera o todo-uno de cantera, por ejemplo.

4.9.2 Información geotécnica

4.9.2.1 Reconocimiento del terreno

Antes de proyectar cualquier obra de dragado, es necesario disponer de información geotécnica adecuada del material a dragar. Parte de esta información es determinante para la propia operación de dragado, ya que permite la selección del equipo de dragado más adecuado, estimando los rendimientos del mismo y las posibles sobreexcavaciones.

El conocimiento de las características del terreno que se va a dragar es también fundamental para:

- ◆ Estudiar las posibles afecciones al medio ambiente, particularmente, posibles efectos contaminantes.
- ◆ Analizar la posibilidad de utilización de los materiales en rellenos portuarios y regeneración de playas.
- ◆ Estudiar la estabilidad de taludes en canales de navegación y dársenas y la posibilidad de afectar a estructuras próximas ya construidas.
- ◆ Selección del lugar de vertido y sus efectos.

Normalmente, la campaña de reconocimientos de los fondos a dragar se realizará de modo conjunto para investigar todos los parámetros de interés que intervienen en el análisis de los distintos temas.

Para estudiar la estabilidad de los taludes y, sobre todo, para estimar el espesor del suelo a dragar en cimentaciones, es preciso conocer la estratificación del fondo, analizando cada nivel, incluso por debajo de la cota de dragado inicialmente prevista, al menos hasta alcanzar una profundidad doble de ésta.

Aunque los sondeos en el mar son más costosos que en tierra, no conviene reducir su número sin tener el convencimiento de que las posibles faltas de homogeneidad del suelo han sido detectadas.

En general, de los distintos suelos que existan, interesa conocer su granulometría y sus límites de Atterberg (si son arenosos tales límites serán nulos), su densidad y humedad y su resistencia. Esta se puede estimar indi-

rectamente mediante ensayos SPT en arenas. En arcillas interesa conocer su resistencia al corte sin drenaje, bien sea mediante ensayos in situ (molinete, presiómetro o penetración estática) o mediante ensayos de laboratorio, y su resistencia a largo plazo (mediante ensayos triaxiales).

Cuando se trata de dragar rocas, interesa conocer la naturaleza de éstas, su posible estratificación y grado de alteración y diaclasamiento. La resistencia a compresión de los fragmentos rocosos que puedan obtenerse mediante sondeos es un índice útil en el proyecto del sistema de dragado.

La descripción de estos y otros ensayos y métodos de reconocimiento, así como las recomendaciones sobre su aplicación, pueden verse en la Parte 2 de esta ROM 0.5.

4.9.2.2 Clasificación de los terrenos a dragar

SUELOS

Los suelos que hayan de ser objeto del dragado deben ser descritos con precisión. Para realizar esa descripción, es recomendable utilizar el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, bien difundido en la práctica de la geotecnia.

Cada suelo se describirá con un nombre, que será el correspondiente al constituyente principal (bolos, gravas, arenas, limos o arcillas). A ese nombre se le añadirán adjetivos que se refieren a:

- ◆ Granulometría. Indicando el contenido de otros componentes. Arcilla limosa, por ejemplo.
- ◆ Naturaleza de los granos y su forma, en los suelos granulares. Arenas silíceas redondeadas o arenas conchíferas angulosas, por ejemplo
- ◆ Compacidad o consistencia. A este respecto se pueden utilizar términos tales como “arenas flojas”, “arcillas limosas firmes”, etc. Cuando se utilizan estas expresiones ha de tenerse presente que, en la práctica habitual, pueden tener un significado ambiguo. A efectos de dar cierta uniformidad al significado de estos términos se recomienda utilizar la Tabla 4.9.1 donde estos calificativos quedan cuantificados.

Tabla 4.9.1. Calificación de los suelos a dragar por su compacidad o consistencia ⁽⁹⁾

Suelos Granulares

Compacidad de arenas	Índice N del SPT
Muy flojas	< 4
Flojas	4-10
Medianamente densas	10-30
Densas	30-50
Muy densas	> 50

Suelos Cohesivos

Consistencia de la arcillas		Resistencia al corte sin drenaje (kN/m ²)
Muy blanda	Al apretarla se escurre entre los dedos fácilmente	< 20
Blanda	Fácil de moldear a mano	20-40
Firme	Requiere un esfuerzo importante para moldearla a mano	40-75
Rígida	No se puede moldear a mano. Se puede rayar con la uña	75-150
Dura	Dura, se puede rayar difícilmente con la uña	> 150

(9) Extraído de las recomendaciones del PIANC. Suplemento al boletín n° 47 (1984).

- ◆ Olor y color. En ocasiones interesan como índices para distinguir distintos niveles del suelo. El olor puede servir para diferenciar los suelos orgánicos.
- ◆ Otros aspectos de interés, tales como posible cementación, posible fisuración, etc.

Estos datos cualitativos, utilizados en memorias u otros elementos de proyecto, deben estar avalados por los ensayos de laboratorio adecuados, tal como se indica en la Parte 2 de esta ROM.

ROCAS

Las rocas que hayan de ser dragadas deben ser descritas indicando, primero, su naturaleza. No suelen existir problemas derivados de una posible falta de precisión en el “nombre” que se le asigne a una determinada roca siempre que sus características queden bien descritas.

Los nombres a asignar a las rocas deben estar de acuerdo con su naturaleza. En la Parte 2 de esta ROM (Tabla 2.4.1) se indican algunos nombres usuales que pueden utilizarse.

La descripción del estado de alteración y de diaclasamiento de las rocas es un dato de interés excepcional. Después de reconocer la roca, en sus diferentes niveles u horizontales, y después de ensayarlos en laboratorio para determinar sus propiedades, se pueden utilizar ciertos adjetivos para calificar su grado de alteración, la resistencia de los fragmentos sanos y el grado de fracturación. El ingeniero puede utilizar los términos que le resulten más convenientes, aclarando, siempre, con referencias cuantitativas su significado.

A estos efectos, se recomienda la utilización de las Tablas 4.9.2, 4.9.3, 4.9.4 y 4.9.5.

Tabla 4.9.2. Terminología a utilizar para definir el grado de alteración de las rocas

Clase	Descripción	Símbolo	Masa alterada	Características
I	Sana, fresca	F	0	Compacta
II	Ligeramente meteorizada	SW	< 10%	Juntas alteradas
III	Algo meteorizada	MW	10-50%	No friable
IV	Muy meteorizada	HW	50-90%	Friable
V	Completamente meteorizada	FW	> 90%	Muy friable

Tabla 4.9.3. Terminología a utilizar en la descripción de la resistencia de la roca matriz ⁽⁹⁾

Término	Resistencia a compresión simple (MN/m ²)
Muy débil	< 1,25
Débil	1,25 a 5
Moderadamente débil	5 a 12,5
Moderadamente resistente	12,5 a 50
Resistente	50 a 100
Muy resistente	100 a 200
Extremadamente resistente	> 200

(9) Extraído de las recomendaciones del PIANC. Suplemento al boletín n° 47 (1984).

Tabla 4.9.4. Criterios de descripción objetiva del estado de fracturación de la roca ⁽⁹⁾

Concepto	Explicación
Testificación del sondeo	El estado de la roca "in situ" es muy importante y por ese motivo es esencial que se especifique el método de perforación utilizado y su diámetro. Además, para describir la integridad de la roca, se pueden utilizar varios criterios que definan el estado de fracturación de los testigos de roca; tales como la recuperación total de testigo, recuperación de testigos íntegros, diagrama de fracturación e índice RQD (Rock Quality Designation). Todos ellos deben incluirse en la columna litológica del sondeo.
Recuperación total de testigo	Se define como la longitud de la cantidad total de testigo recuperado, expresado en tanto por ciento de la longitud de la maniobra.
Recuperación de testigos íntegros	Se define como la longitud de testigo recuperada como cilindros de roca, expresada en tanto por ciento de la longitud de la maniobra.
Diagrama de fracturación	Expresa el número de fracturas naturales existentes en una longitud arbitraria de sondeo, por ejemplo el número de fracturas naturales por metro lineal de sondeo.
Índice RQD	(Rock Quality Designation) es una medida cuantitativa del estado de fracturación de la roca. El RQD es la suma de las longitudes de todos los trozos del testigo (de 100 mm o más largos) medidas a lo largo del eje del testigo y expresada como tanto por ciento del testigo perforado.

Tabla 4.9.5. Clasificación de macizos rocosos según el valor del índice RQD

RQD (%)	Calidad del macizo
90-100	Excelente
75-90	Muy buena
50-75	Buena
25-50	Regular
10-25	Mala

4.9.3 Taludes de dragado

La estabilidad de los taludes de dragado debe analizarse siguiendo las recomendaciones que se indican en el apartado 3.8 y 3.10 de esta ROM.

Las operaciones de dragado son, sin embargo, específicas y requieren algunas consideraciones especiales a tener en cuenta, respecto a los procedimientos generales de cálculo que allí se indican.

En el momento del dragado, la acción de la draga sobre el terreno, sobre todo cuando se trata de grandes dragas de succión, es violenta. En los suelos blandos (sean arenosos o arcillosos) suele generar excesos de presión intersticial transitorios que hacen que la estabilidad en condiciones no drenadas pueda ser crítica.

Las arenas densas y las arcillas firmes, sin embargo, suelen soportar mejor la acción de las dragas. Su estabilidad está condicionada, en general, por las condiciones drenadas.

SUELOS COHESIVOS

Los cálculos de estabilidad en condiciones no drenadas deben realizarse, en los suelos cohesivos, suponiendo un ángulo de rozamiento virtual nulo, una cohesión igual a la resistencia al corte sin drenaje y un peso específico igual al peso específico sumergido, esto es:

(9) Extraído de las recomendaciones del PIANC. Suplemento al boletín n° 47 (1984).

$$\begin{array}{l} \text{Condiciones no drenadas:} \\ \phi_{\text{cálculo}} = 0 \\ c_{\text{cálculo}} = s_u \\ \gamma_{\text{cálculo}} = \gamma' \end{array}$$

En los cálculos en condiciones no drenadas no se tendrán en cuenta los posibles efectos de las presiones intersticiales generadas por la actuación de la draga. Para tomar en consideración, en su caso, las presiones intersticiales generadas en dicho tipo de suelo por la acción del oleaje y demás oscilaciones del mar, se dan recomendaciones en los apartados 3.4.5, 3.4.11 y 3.10 de esta Recomendación.

A largo plazo, una vez el suelo cohesivo se haya acomodado al nuevo estado tensional, se debe comprobar la estabilidad mediante cálculos con parámetros de resistencia deducidos de ensayos triaxiales tipo CD o CU con medida y descuento de las presiones intersticiales (u otros ensayos equivalentes, según se indica en la Parte 2 de esta ROM). Esto es:

$$\begin{array}{l} \text{Condiciones drenadas:} \\ \phi_{\text{cálculo}} = \phi \\ c_{\text{cálculo}} = c \\ \gamma_{\text{cálculo}} = \gamma' \end{array}$$

En los cálculos en condiciones drenadas y en zonas donde pudiera existir un gradiente de filtración del agua intersticial del interior del talud hacia el exterior (por ejemplo, taludes en zonas intermareales en marea baja), se incluirán en los cálculos los posibles excesos de presión intersticial en el terreno respecto al borde libre del talud.

Se admite, como simplificación del lado de la seguridad y para tener en cuenta este efecto, multiplicar por un medio la tangente del ángulo de rozamiento para obtener la tangente del ángulo de rozamiento virtual equivalente con el que se realizaría el cálculo. Esto es:

$$\text{tg}\phi_{\text{cálculo}} = \frac{1}{2} \text{tg}\phi$$

SUELOS GRANULARES

La susceptibilidad a la acción de la draga de las arenas finas poco densas hace que los métodos de cálculo de la estabilidad de taludes no sean aplicables para analizar su comportamiento en condiciones no drenadas. Únicamente la observación del comportamiento en las primeras fases del dragado o experiencias previas puede permitir la estimación aproximada de los taludes convenientes.

Para tomar en consideración, en su caso, las presiones intersticiales generadas en dicho tipo de suelo por la acción del oleaje y demás oscilaciones del mar se dan recomendaciones en los apartados 3.4.5, 3.4.11 y 3.10.3 de esta Recomendación.

En arenas más densas y menos finas sólo es necesario comprobar la condición de estabilidad teórica en condiciones drenadas.

Si el talud está en una zona con movimientos de agua importantes, que generen un flujo de agua intersticial del interior al exterior del talud, se tendrán en cuenta los posibles excesos de presión intersticial entre el terreno y el agua libre junto al talud.

En estos casos en que el talud esta afectado por el movimiento del agua, se admite, como simplificación del lado de la seguridad, dividir por 2 la tangente del ángulo de rozamiento para obtener la tangente del ángulo de rozamiento virtual equivalente con el que se deben realizar los cálculos. Esto es:

$$\text{tg}\phi_{\text{cálculo}} = \frac{1}{2} \text{tg}\phi$$

Si el talud está situado en una zona afectada por la acción del oleaje también deberán tomarse en consideración en los cálculos en condiciones drenadas las presiones intersticiales de filtración generadas por dicha acción, de acuerdo con lo dispuesto en los apartados 3.4.5, 3.4.11 y 3.10.3 de esta ROM.

ROCAS

La estabilidad de taludes de dragado en roca puede analizarse por los procedimientos generales que se indican en 3.8.5. Los cálculos deben realizarse con los pesos sumergidos.

En aquellos casos en los que las diaclasas de las rocas estén abiertas, se deben considerar los posibles excesos de presión intersticial sobre el valor de la presión del agua en el paramento del talud. A falta de estudios más detallados, el efecto del movimiento del agua del interior del talud hacia el exterior puede considerarse indirectamente, reduciendo la tangente del ángulo de rozamiento en las diaclasas de la roca con un coeficiente comprendido entre 0,5 y 0,8. Esta reducción será tanto mayor cuanto más permeable sea el sistema de diaclasas de la roca y cuanto mayor sea el movimiento del mar en el entorno del talud.

TALUDES DE DRAGADO USUALES

En la práctica, las inclinaciones de los taludes de dragado con la horizontal, con los que se suelen proyectar los dragados, se indican en la Tabla 4.9.6.

Tabla 4.9.6. Taludes de dragado usuales (H/V)

Tipo de terreno	Aguas tranquilas	Zonas con movimiento de agua del interior al exterior en talud
Fangos	20 a 6	20 a 10
Arenas finas flojas	6 a 4	10 a 6
Arenas gruesas	4 a 3	6 a 4
Arenas arcillosas	3 a 2	4 a 3
Arcillas de consistencia firme	2 a 1	3 a 1,33
Arcillas duras	1 a 0,5	1,33 a 0,5
Rocas ⁽¹⁰⁾	0,5 a 0,1	0,5 a 0,1

COEFICIENTES DE SEGURIDAD MÍNIMOS FRENTE A LA PÉRDIDA DE LA ESTABILIDAD

En cualquier caso, se deberá verificar la seguridad de los taludes de dragado frente a la pérdida de estabilidad en todas las situaciones de proyecto. Los coeficientes de seguridad mínimos exigibles deberán fijarse oportunamente en las bases de proyecto de cada obra en cuestión, en función de la importancia de la obra y de las consecuencias del fallo.

Si se utilizan los procedimientos de cálculo establecidos en el apartado 3.8 se considera aceptable que, en obras de ISA no significativo, se admitan como coeficientes de seguridad mínimos los incluidos en la Tabla 4.9.7. Como se ha indicado en el procedimiento general establecido en dicha Recomendación, dichos coeficientes están asociados a probabilidades de fallo del orden de 10^{-2} .

(10) En las rocas sedimentarias alteradas con buzamiento desfavorable, puede ser conveniente un talud de dragado más suave, siguiendo la estratificación.

Tabla 4.9.7. Coeficientes de seguridad mínimos recomendados frente a la pérdida de estabilidad de taludes de dragado. Obras con ISA no significativo (< 5)

Tipo de combinación de acciones	Coefficiente
Cuasi-permanentes	1,30
Fundamentales	1,20
Accidentales o Sísmicas	1,00

Para obras con ISA diferente o para otras probabilidades de fallo admisibles, los valores mínimos del coeficiente de seguridad establecidos en la Tabla 4.9.7 pueden adecuarse según se indica en los apartados 3.3.8.2 y 3.3.10. Asimismo podrán adecuarse para situaciones transitorias (incluyendo situaciones geotécnicas de corto plazo) de acuerdo con lo previsto en 3.3.8.1.

En canales de navegación y en zonas afectadas por el efecto del oleaje pueden existir velocidades del agua en las zonas próximas a los taludes de dragado que causen problemas de erosión. En esos casos se estudiará la protección superficial más conveniente. En los apartados 4.2.3.7, 4.3.5.3 y 4.3.5.7 se indican algunas recomendaciones que pueden ser de interés en este caso.

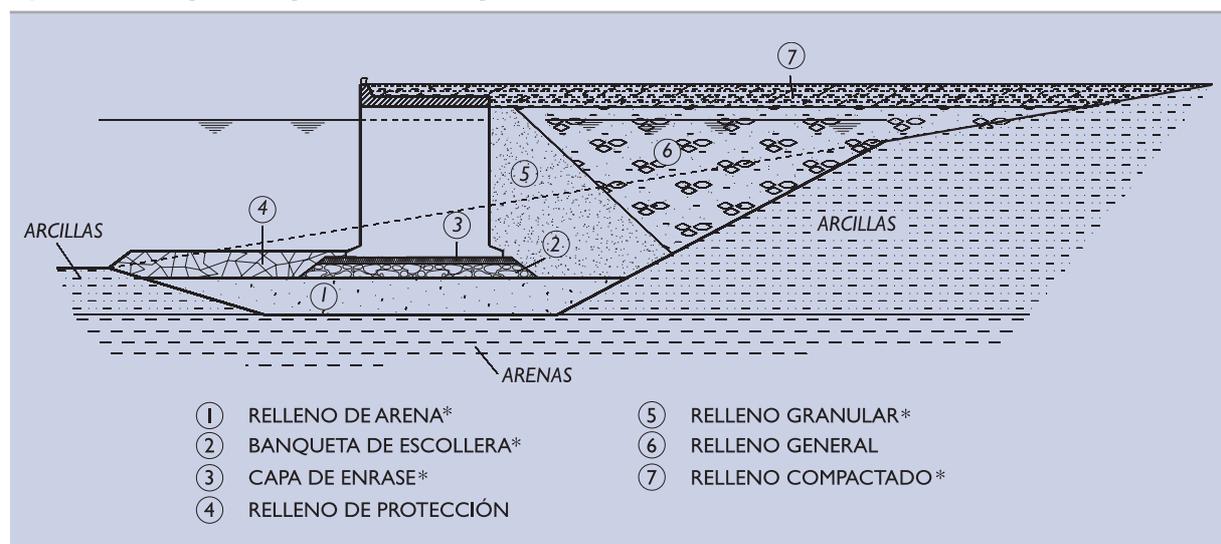
4.9.4 Tipos de relleno

Los rellenos pueden clasificarse atendiendo a varios criterios. Un criterio usual, que se utilizará en los apartados que siguen, será la clasificación según su naturaleza. En ese sentido existirán tantos tipos de rellenos como suelos y rocas existen, además de aquéllos realizados con materiales no convencionales (escorias, cenizas y otros subproductos industriales) así como las basuras y residuos urbanos.

A efectos de las recomendaciones que siguen conviene distinguir tres tipos de rellenos atendiendo a su uso. Esos tipos se denominarán “estructurales”, “generales” y “vertederos”.

En la Fig. 4.9.2 se indica de manera esquemática la sección tipo por un muelle donde se distinguen algunas zonas de relleno típicas.

Figura 4.9.2. Esquema de posibles rellenos junto a un muelle



Nota: Los rellenos marcados con * deben considerarse “estructurales”.

El relleno n° 1 puede estar formado por otro material, escollera o todo-uno de cantera, por ejemplo.

El relleno de coronación, n° 7, debe considerarse estructural en las zonas de operación y almacenamiento.

RELLENOS ESTRUCTURALES

Se denominan como tales, en esta ROM, aquellos rellenos que estén próximos a las estructuras y cuyas características jueguen un papel importante en la estabilidad o deformación de la estructura.

Los rellenos estructurales pueden colocarse en obra o bien en seco o bien sumergidos. Se pueden colocar rellenos en seco siempre que se esté por encima del nivel del mar o a mayores profundidades, rebajando artificialmente el nivel del agua en el lugar de colocación.

RELLENOS GENERALES

Se entienden como rellenos generales aquéllos que se utilicen en las zonas marítimas y portuarias que no tengan una misión estructural aparte de servir como soporte de la coronación (generalmente formada por un relleno compactado en seco) sobre la que se construye el pavimento.

Normalmente los rellenos generales se ejecutarán sumergidos, aunque en ocasiones, con medidas artificiales de rebajamiento del nivel freático, será posible construir parte de algunos rellenos generales en seco.

VACIADEROS Y VERTEDEROS

Los vertederos (o vaciaderos) son las zonas de relleno donde se vacían los productos de excavación sobrantes no utilizables en otras zonas del puerto.

4.9.5 Características de los rellenos

4.9.5.1 Rellenos sumergidos de vertido directo

Los rellenos sumergidos, realizados mediante vertido directo de productos controlados en origen, tienen igual composición granulométrica y plasticidad (esta última en caso de suelos arcillosos) que la que se deduce de los ensayos de control en origen, cuando el transporte es por vía seca (camiones, cintas transportadoras, etc). Su densidad y su estructura, sin embargo, sólo pueden conocerse mediante ensayos “a posteriori”. El proceso de colocación se podría simular en laboratorio.

Las características geotécnicas que pueden esperarse en los rellenos sumergidos de vertido directo son las que se comentan a continuación. En la Tabla 4.9.8 se indican unos valores medios típicos.

MATERIALES GRANULARES LIMPIOS

Los rellenos granulares cuyo contenido en finos, después de la colocación, sea inferior al 10% (aproximadamente) se compactan por su propio peso hasta densidades relativas del orden del 50%.

Las características de resistencia, deformabilidad y permeabilidad pueden conocerse mediante ensayos de laboratorio con muestras, de la misma granulometría, preparadas con las densidades relativas que se esperan obtener en obra.

Los rellenos de arenas finas son sensibles a las vibraciones y pueden licuarse durante los sismos. Ver apartado 3.10.

Las características de los rellenos granulares sumergidos pueden mejorarse por distintos procedimientos. Ver apartado 3.9.

Tabla 4.9.8. Valores típicos de algunas propiedades en rellenos sumergidos recién vertidos

Tipo de material	Peso específico seco γ_d (kN/m ³)	Resistencia al corte			Módulo de deformación $E_2^{(1)}$ (MN/m ²)
		Sin drenaje	Con drenaje		
		s_v (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	
Escolleras	17	–	–	40 ⁽²⁾	30
Todo-uno de cantera	18	–	–	40 ⁽²⁾	30
Gravas arenosas	18	–	–	35	30
Arenas limpias	16	–	–	30	20
Arenas limosas	12	–	–	20	10
Limos (fangos)	8	10	0	6 ⁽³⁾	1 ⁽⁴⁾
Arcillas de baja plasticidad	8	10	0	6 ⁽³⁾	1 ⁽⁴⁾
Arcillas de alta plasticidad	8	10	0	6 ⁽³⁾	1 ⁽⁴⁾

(1) Módulo de descarga-recarga correspondiente a pequeños cambios de carga.

(2) El ángulo de rozamiento de las escolleras y todo-uno de cantera puede disminuir al aumentar la presión de confinamiento. Ver apartado 4.7.2.2.

(3) Ángulo de rozamiento aparente para cálculos de estabilidad a largo plazo considerando el estado de subconsolidación.

(4) La compresibilidad, en estos casos, se mide mejor con el índice de compresión, C_c . Ver apartado 2.2.10.2.

MATERIALES GRANULARES SUCIOS

Las arenas limosas (con más del 10% de finos, aproximadamente) y los limos suelen dar lugar a rellenos sumergidos de muy baja densidad. La consolidación bajo su propio peso puede ser lenta.

Las características de resistencia, permeabilidad y deformabilidad pueden investigarse en el laboratorio con muestras preparadas mediante sedimentación con materiales de igual granulometría que la del relleno que se estudia.

Normalmente no son aptos para soportar cimentaciones directas de cierta importancia, salvo que sean sometidos a un tratamiento previo de mejora.

Estos rellenos también pueden ser susceptibles a las vibraciones y pueden sufrir licuefacción. Su mejora mediante técnicas de tratamiento puede ser interesante en algunos casos. Estos aspectos se contemplan en los apartados 3.9 y 3.10 de esta ROM.

MATERIALES COHESIVOS

Los materiales cohesivos blandos dan lugar a rellenos de una densidad muy baja, de compresibilidad muy elevada y de difícil mejora mediante tratamientos artificiales, dada su escasa permeabilidad.

Los terrones de arcilla vertidos directamente al agua pueden dar lugar a una estructura muy abierta. Con el paso del tiempo y a medida que se van deshaciendo los terrones, se va reduciendo el volumen de los huecos y se van generando, en consecuencia, asientos importantes.

4.9.5.2 Rellenos hidráulicos

Los rellenos hidráulicos son aquellos que se colocan en obra mediante un proceso de sedimentación de partículas sólidas contenidas en un efluente que procede de un dragado en un recinto cerrado y relativamente estanco. Dicho efluente se caracteriza principalmente por su caudal y por el contenido de sólidos en suspensión.

Las características de los rellenos hidráulicos dependen de la naturaleza del material que queda en el relleno tras el proceso de excavación, transporte y sedimentación.

Los rellenos hidráulicos tienen unas características que pueden ser muy distintas de las correspondientes a las de los materiales de préstamo en origen. Las arenas pierden sus finos tanto en las operaciones de dragado como en las del transporte (si hay alguna manipulación intermedia) y, sobre todo, en el proceso de sedimentación, cuando ésta se hace sobre grandes áreas.

Es sabido que junto a las zonas de vertido, cuando el transporte se hace por tubería, se segregan los suelos más gruesos, mientras que las partículas finas tardan más en depositarse e incluso pueden ser arrastradas por el caudal efluente. Por ese motivo, conviene disponer los puntos de vertido en las zonas donde interesa una mayor calidad de relleno.

Manejando debidamente las operaciones de dragado y relleno, es posible conseguir buenos rellenos de arenas limpias con préstamos de arenas limosas. El proceso de lavado de finos se puede controlar a costa de una serie de trabajos de control en origen y destino, con toma de muestras continuas tanto en el préstamo como en el relleno.

Los productos de dragados en suelos arcillosos, transportados por tubería y vertidos, dan lugar a rellenos en los que parte de los terrones de arcillas aún están sin deshacer y que, debido al transporte, tienen formas redondeadas. El relleno resultante es de escasa resistencia y alta compresibilidad.

4.9.5.3 Rellenos en seco

Los rellenos realizados en seco con productos controlados tienen, después de colocarlos en obra, las mismas características granulométricas y de plasticidad (o muy similares) que las que se deducen del control en origen. Para conocer las características finales de estos rellenos se puede, por lo tanto, analizar con antelación los préstamos del material, mediante ensayos oportunos, con muestras compactadas en el laboratorio con energías específicas similares a las que se piensa utilizar en obra.

Las características típicas que pueden esperarse de los rellenos compactados en seco se ilustran en la Tabla 4.9.9. El conocimiento más ajustado de sus propiedades debe investigarse vía ensayos de laboratorio y mediante ensayos de campo como los indicados en la Parte 2 de esta ROM.

Tabla 4.9.9. Valores típicos para algunas propiedades de rellenos compactados en seco

Tipo de material	Peso específico seco γ_d (kN/m ³)	Resistencia al corte			Módulo de deformación $E_2^{(1)}$ (MN/m ²)
		Sin drenaje s_u (kN/m ²)	Con drenaje		
			c (kN/m ²)	ϕ (°)	
Todo-uno de cantera	23	–	0	50	200
Gravas arenosas	21	–	0	45	150
Arenas limpias	19	–	0	35	50
Arenas limosas ⁽²⁾	18	–	10	32	40
Limos ⁽³⁾	14	40	20	28	20
Arcillas de baja plasticidad	16	200	20	25	20
Arcillas de alta plasticidad	13	100	20	20	10

(1) Módulo de recarga de ensayos de placa de carga de 30 cm de diámetro.

(2) Con más del 10% de contenido en finos.

(3) Los limos, compactados en seco, pueden colapsar (asentar sin variar la carga vertical) al saturarse.

4.9.6 Consolidación de los rellenos

Los rellenos de las obras marítimas y portuarias pueden utilizarse con el grado de consolidación natural que resulte tras su puesta en obra. El ingeniero debe estudiar, sin embargo, la posibilidad de mejorar sus características ya que, en algunas ocasiones, puede resultar conveniente.

Los rellenos generales pueden ser causa de asientos importantes y afectar a los pavimentos que se construyen sobre ellos. Antes de construir un pavimento debe estimarse el asiento máximo que éste ha de soportar y si tal asiento es elevado (ver ROM 4.1- Pavimentos Portuarios) será preceptivo tomar alguna medida preventiva.

En este apartado se indican algunos criterios que pueden ayudar al ingeniero en la estimación del asiento de los pavimentos.

4.9.6.1 Asiento de los rellenos generales

El asiento de la superficie de los rellenos será, en general, debido a dos sumandos:

- ◆ La compresibilidad de los terrenos naturales sobre los que construye el relleno.
- ◆ La compresibilidad del propio relleno.

En ambos casos, el asiento es producido por el peso del suelo natural (que, en ocasiones, está aún con un proceso de consolidación en marcha antes de colocar el relleno), el peso del propio relleno, el de la coronación del relleno y del posible pavimento, así como por el efecto de las cargas de explotación sobre el pavimento.

El rebajamiento natural o artificial del nivel freático puede ser causa de asientos adicionales.

La estimación de los asientos y de su evolución es un problema teórico que el ingeniero debe plantear y resolver con la ayuda de ensayos de laboratorio, preferentemente ensayos edométricos, realizados con muestras inalteradas de los materiales compresibles. La compresibilidad y permeabilidad de las arenas finas, y otros materiales de difícil muestreo, puede estimarse indirectamente mediante otros ensayos adecuados. En la Parte 2 de esta ROM se dan indicaciones sobre los tipos de reconocimientos y ensayos que se pueden realizar para conocer estas propiedades.

En casos de rellenos heterogéneos o de difícil muestreo, el ingeniero puede ayudarse, en esta estimación de asientos, con ensayos o pruebas de campo como la que se describe a continuación. Ello no evitará la estimación teórica basada en ensayos de laboratorio, antes indicada.

4.9.6.2 Procedimiento de observación

El método que se propone en este apartado está fundado en la hipótesis básica de que los asientos evolucionan a largo plazo según leyes temporales de tipo logarítmico. De ese tipo es la ley más conocida de la consolidación unidimensional para grados de consolidación avanzados y de ese tipo son las leyes usualmente empleadas para interpretar los procesos de consolidación secundaria.

El método consiste en auscultar la zona, observarla durante cierto tiempo y después cargarla en un área aproximadamente circular, cuyo diámetro en planta sea al menos tres veces mayor que el espesor de suelos cuya compresión pueda causar asientos. La intensidad de la carga (altura de tierras) debe ser tal que produzca en el terreno la misma presión que el resto del relleno que falte por colocar, más la del pavimento y su futura carga de uso.

A estos efectos la carga de uso se debe traducir a una carga permanente equivalente. Esta carga puede aproximarse por el valor de combinación cuasi-permanente.

La observación de los asientos puede hacerse mediante nivelación periódica de referencias que asienten con el relleno, tales como placas de asiento ligeramente enterradas.

Las bases fijas de observación deben apoyarse en terreno firme. A estos efectos puede ser necesario colocar referencias ancladas a suficiente profundidad dentro de perforaciones entubadas que alcancen un terreno firme.

Es conveniente también colocar piezómetros puntuales (neumáticos o, preferiblemente, de cuerda vibrante) para poder observar las variaciones de presión intersticial a distintas profundidades y en distintas localizaciones en planta, bajo la carga que se va a aplicar.

a. Observación previa a colocar la sobrecarga de prueba

La observación previa de la consolidación natural existente es conveniente para saber si existe algún movimiento anterior a la colocación de las tierras necesarias para realizar la prueba.

La observación de la zona, antes de colocar la sobrecarga de prueba, debe prolongarse el tiempo suficiente para permitir la determinación de la velocidad de los asientos naturales del relleno, sin sobrecarga alguna.

Si la velocidad de asientos es inapreciable (menor que 2 mm/año, aproximadamente), se interpretará que el relleno no está sufriendo asientos naturales y se dará por concluida la observación, pasando a colocar la sobrecarga.

b. Colocación de la sobrecarga de prueba

La colocación de la sobrecarga hará asentar las referencias de nivelación previamente colocadas y permitirá ir tomando datos de asientos en distintas campañas de nivelación.

Los asientos de los distintos puntos de observación permitirán estimar un asiento máximo asignable a la zona central de la prueba correspondiente a cada campaña de lectura.

El asiento de la zona central de la prueba, obtenido en cada campaña de lectura, permitirá calcular, en varios momentos, la velocidad del asiento debido a la carga añadida. Para ello es necesario que a las velocidades medidas se les reste la velocidad de asiento natural, v_0 , que se hubiera observado antes de colocar la carga.

Con estos datos se dibujará un diagrama, con los datos de tiempo en el eje X y los datos de la inversa de la velocidad de asientos en el eje Y. En la Fig. 4.9.3 se indica esquemáticamente este dibujo.

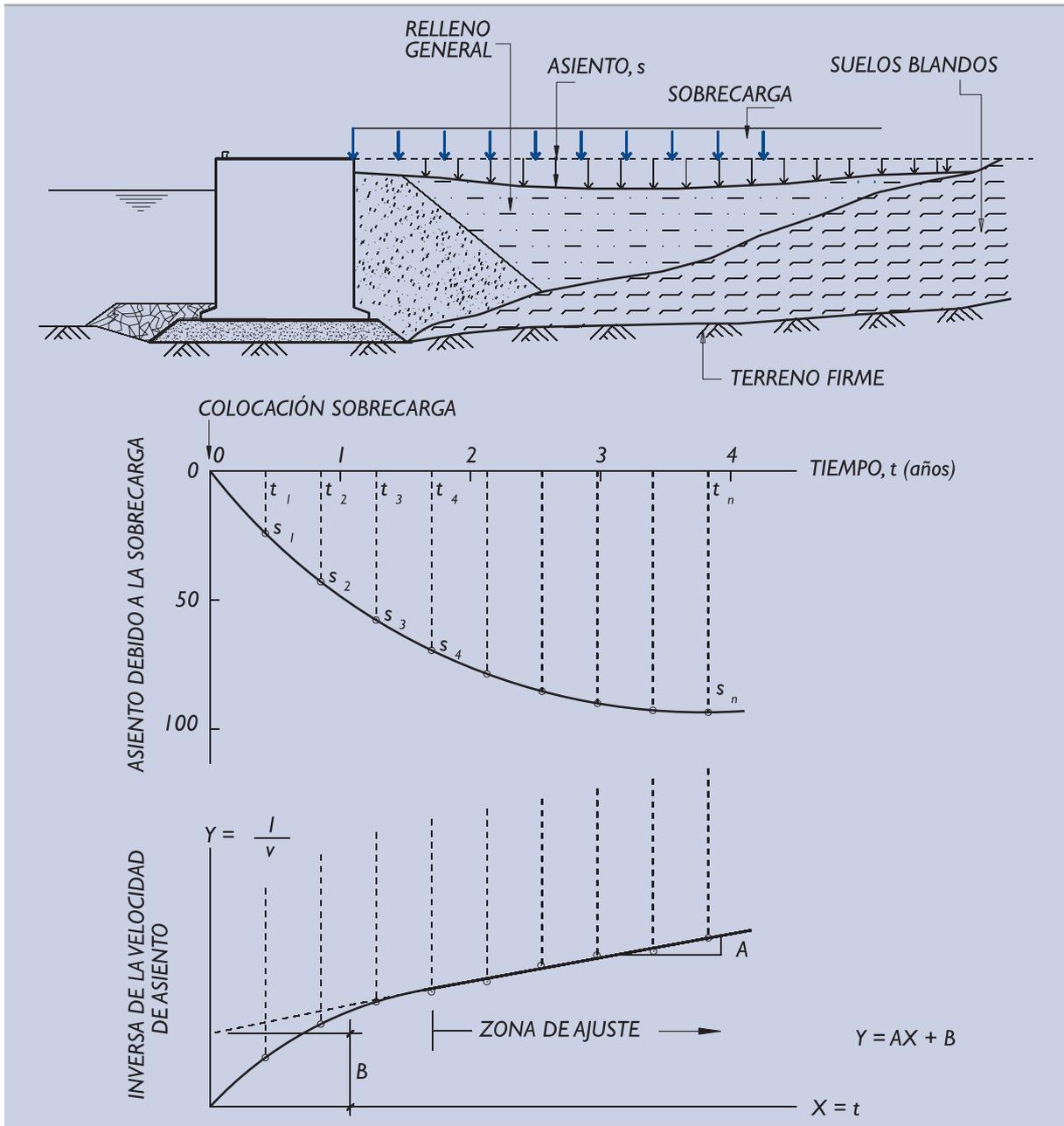
La forma de esta curva permitirá identificar una zona recta para tiempos altos. Ello puede requerir la prolongación del período de observación; de otra forma podría llegarse a conclusiones pesimistas.

Eliminando los primeros datos, esto es, los que más se desvían de la ley de evolución lineal de Y con X, se debe definir (con el método de los mínimos cuadrados, por ejemplo) una recta que se ajuste a las observaciones y así obtener los parámetros A y B que permitirán extrapolar los asientos observados.

La observación de la evolución de los piezómetros permitirá comprobar, además, que, antes de dar por concluida la prueba, los excesos de presión intersticial que pudiera haber generado la carga de prueba ya se han disipado (los excesos de presión sobre la correspondiente al nivel freático estacionario deben ser inferiores al 10% de la carga de prueba aplicada, aproximadamente).

Si los piezómetros indican que los excesos de presión intersticial son aún altos cuando se concluye la prueba, debe utilizarse otro procedimiento de interpretación. El que aquí se indica puede conducir a conclusiones pesimistas.

Figura 4.9.3. Esquema del asiento de los rellenos



c. Asientos del pavimento

Una vez concluida la prueba y analizados los datos como se indica en los apartados precedentes, se puede estimar el asiento que experimentaría el posible pavimento construido sobre el relleno en estudio.

El asiento del pavimento se puede suponer definido por la ley:

$$s(t) = s_f + v_o(t - t_f) + \frac{l}{A} \ln \frac{At + B}{At_f + B}, \quad (t > t_f)$$

donde:

- A y B = parámetros de ajuste obtenidos al interpretar los asientos provocados por la sobrecarga.
- t = tiempo transcurrido desde la construcción del pavimento.
- s_f = asiento obtenido al final de la prueba de carga.
- v_o = velocidad de asiento observada antes de colocar la sobrecarga de prueba.
- t_f = duración de la prueba de carga.

Como quiera que este procedimiento se basa en una extrapolación de los asientos observados, el resultado obtenido será tanto más preciso cuanto mayor sea el tiempo de duración de la prueba.

4.9.7 Otras recomendaciones

En este apartado se indican una serie de recomendaciones que no tienen carácter exhaustivo. El ingeniero debe considerarlas al programar las actividades de movimiento de tierras, en su proyecto.

4.9.7.1 Selección de rellenos

Los rellenos a utilizar en las zonas portuarias han de seleccionarse en función de la misión que hayan de cumplir. Se debe considerar, especialmente, la posible utilización de productos de excavación sobrantes.

La obtención de préstamos arenosos de fondos marinos puede ofrecer ventajas sobre otros préstamos terrestres equivalentes. Entre otras, el menor impacto visual y evitar expropiaciones u ocupaciones que pueden ser problemáticas. Dada la influencia que tiene el procedimiento de dragado, transporte y vertidos en la calidad del relleno resultante, se deberán tener en cuenta estas influencias a la hora de proyectar la explotación de un préstamo del fondo marino.

En los párrafos que siguen se dan algunas ideas sobre las calidades que deben tener los distintos tipos de relleno.

RELLENOS ESTRUCTURALES SUMERGIDOS

La compactación bajo el agua de los rellenos que no sean granulares es difícil. Los rellenos granulares, sin embargo, se compactan con su propio peso hasta densidades relativas del orden del 50% y además pueden ser compactados posteriormente mediante alguno de los procedimientos indicados en 3.9, si se requiriese.

El empuje contra las estructuras de contención de los materiales de relleno estructurales será tanto menor cuanto mayor sea el ángulo de rozamiento del suelo y cuanto mayor sea su permeabilidad. Por ese motivo, se recomienda que los rellenos estructurales estén formados siempre por materiales granulares, preferentemente gravas arenosas o todo-uno de cantera.

Salvo una justificación, basada en ensayos adecuados, se entenderá, a estos efectos, que un material es granular cuando su contenido en finos (tamiz 0,008 UNE) sea inferior al 10%. En el caso de escollera o “todo-uno” de cantera, en los que buena parte del peso esta en tamaños superiores a una pulgada (25 mm), se entenderá que el 10% de finos mencionado se refiere precisamente al peso de la fracción que pasa por el tamiz de una pulgada.

En caso de utilizarse, con alguna misión estructural, rellenos sumergidos de carácter no granular, se deberá estudiar detalladamente su resistencia mediante ensayos de laboratorio adecuados. De otra forma la predicción de esta resistencia ha de ser claramente conservadora.

RELLENOS COMPACTADOS EN SECO

El material a utilizar en los rellenos estructurales compactados puede ser de cualquier naturaleza aunque deben excluirse:

- ◆ Materiales que contengan cantidades importantes de materia orgánica. Más del 2% en peso se considera ya excesivo.
- ◆ Materiales que contengan rocas evolutivas, especialmente los materiales yesíferos.
- ◆ Ciertas escorias que puedan presentar carácter expansivo.
- ◆ Suelos arcillosos de alta plasticidad.
- ◆ Residuos urbanos (cascotes, vidrios, etc.) difícilmente compactables.
- ◆ Suelos contaminados con sustancias que puedan dañar al medio ambiente.

RELLENOS GENERALES SUMERGIDOS

Los rellenos generales se ejecutarán normalmente sumergidos, de manera que no sufran más proceso de compactación que el debido a su propio peso.

Si el material de aportación es granular, el relleno resultante puede ser de cierta calidad, de otra forma resultará un relleno poco resistente y muy compresible.

4.9.7.2 Precauciones en la realización de dragados

En los dragados en zanja que tengan por objeto una mejora de la cimentación, es muy importante que se cuide la limpieza de los fondos de éstas, no dejándose residuos procedentes del propio dragado. En aquellos casos en los cuales las zanjas están situadas en lugares con aterramientos o aportes continuados de fangos, conviene realizar un dragado de limpieza, inmediatamente antes de la colocación de las banquetas de escollera o del elemento estructural correspondiente, para evitar el posible debilitamiento del contacto.

Frecuentemente han de ejecutarse dragados muy próximos a obras ya construidas, en cuyo caso ha de estudiarse la influencia del nuevo dragado en la estabilidad de las obras existentes. Las tolerancias deben ser muy estrictas. La ejecución del dragado en estos casos debe ser muy precisa, para evitar que los taludes de la zona dragada pudieran descalzar las obras colindantes. Para ello se han de elegir equipos que permitan esa precisión, aunque su rendimiento sea menor.

4.9.7.3 Precauciones en la ejecución de los rellenos

Los rellenos estructurales colocados en seco serán extendidos y compactados por tongadas. En su ejecución, se llevará control de las densidades que se pueden alcanzar y de las humedades óptimas de colocación (ensayos de compactación), así como de las densidades realmente alcanzadas (humedades y densidades «in situ»). En general, se requerirá un grado de compactación entre el 95% y el 105% de la correspondiente al ensayo de compactación Proctor Normal, según la misión estructural del relleno.

El control de compactación de materiales granulares con gruesos puede realizarse con la ayuda de ensayos de placa de carga. Conviene que éstas sean de gran tamaño (ϕ 600 mm, por ejemplo).

Cuando se compacten rellenos junto a estructuras de contención se pueden producir aumentos transitorios de los empujes, que deberán ser considerados en los cálculos.

Para reducir los asientos diferidos de las explanadas conseguidas con los rellenos generales, se pueden tomar varias acciones, entre otras:

- ◆ Dragar los fondos de las zonas a rellenar, de manera que la base de apoyo sea de calidad similar o mejor que la del relleno a colocar.
- ◆ Utilizar materiales de relleno de la mayor calidad posible.
- ◆ Realizar alguno de los tratamientos del terreno que se indican en 3.9.

4.9.7.4 Estudio de los vertidos

En algunos dragados cuyo objetivo no es la obtención de préstamos, pueden existir graves dificultades para el vertido de los materiales de dragado en el propio mar. Para resolver este problema puede ser necesario construir vaciaderos, que son unos recintos formados por diques o motas que crean un vaso de contención para estos productos.

Desde un punto de vista geotécnico, en relación con estos recintos, deben analizarse, entre otras, las tres cuestiones siguientes:

- ◆ La estabilidad de los diques y motas teniendo en cuenta las características del material dragado, de los diques y del fondo, que frecuentemente está constituido por terrenos poco competentes.
- ◆ La posibilidad de utilización de los rellenos así obtenidos para soportar cargas, estudiando su consolidación.

El proceso de sedimentación del efluente, si el sistema de vertido es hidráulico.

4.10 OTRAS OBRAS MARÍTIMAS Y PORTUARIAS

La gran variedad de obras que se suelen construir en el entorno portuario o marítimo hace prácticamente inviable considerar específicamente cada una de ellas.

Existen, sin embargo, algunos tipos de obras o instalaciones, además de las consideradas en los apartados precedentes, que tienen algunos aspectos geotécnicos que conviene destacar en esta parte de la ROM 0.5. En futuros documentos del Programa ROM, estos otros tipos de obra podrán ser considerados con mayor amplitud.

4.10.1 Duques de alba

Las estructuras conocidas bajo este nombre suelen ser elementos dispuestos en el entorno portuario para soportar esfuerzos horizontales de atraque o amarre. En ocasiones se construyen para servir de elementos de protección de otras estructuras (posibles choques de embarcaciones contra pilas de puentes en vías de navegación, por ejemplo).

4.10.1.1 Tipologías

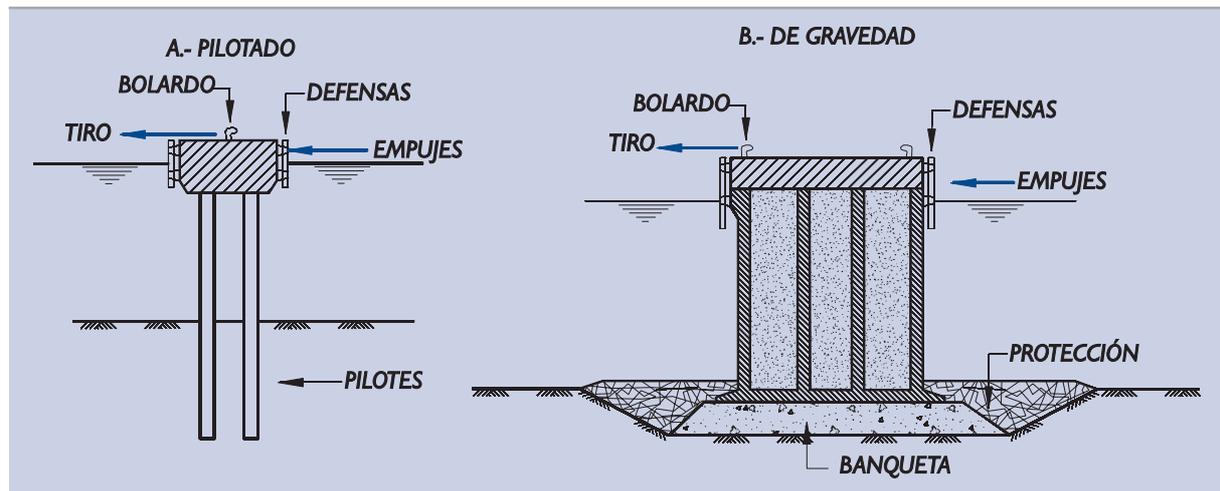
El soporte de los esfuerzos horizontales que pueden actuar en los duques de alba puede hacerse mediante estructuras de gravedad, cimentadas en general superficialmente, o mediante estructuras cimentadas en profundidad. Un esquema de esas tipologías se incluye en la Fig. 4.10.1.

En ambos casos existe una superestructura que recibe las defensas contra los empujes y/o los bolardos para el tiro.

Pueden existir duques de alba de estructuras muy variadas, tantas como soluciones de gravedad pueden darse en los muelles (cajones, recintos de tablestacas, etc.), o soluciones pueden darse para realizar cimentaciones profundas (grandes pilotes aislados, grupos de pilotes de menor tamaño, pilotes formados por tablestacas metálicas hincadas, etc.).

Los pilotes de gran capacidad estructural pueden utilizarse individualmente para formar duques de alba tipo “monopilote”.

Figura 4.10.1. Esquemas para duques de alba



4.10.1.2 Problemas geotécnicos asociados

Aparte de los problemas geotécnicos que pueda presentar la cimentación de la estructura del duque de alba que sean comunes con otras estructuras similares, destaca el problema geotécnico asociado a la componente horizontal de la carga.

En las estructuras de gravedad, el vuelco será el aspecto crítico que condicione el proyecto. Eso no evitará que se hagan todas las comprobaciones de seguridad indicadas en el apartado 3.5, para las cimentaciones superficiales, así como en las recomendaciones indicadas para las estructuras de tipología similar, consideradas en esta Parte 4.

Las estructuras pilotadas deben comprobarse, principalmente, frente a la rotura horizontal del terreno (apartado 3.6.8), que será en general la condición crítica de proyecto, en cuanto a problemas geotécnicos se refiere. Normalmente la capacidad estructural del duque de alba debe agotarse antes de que se produzca la rotura horizontal del terreno. Los otros Estados Límite Últimos de las soluciones pilotadas, indicados en el apartado 3.6, deben considerarse también en el proyecto de los duques de alba.

El tiro de los amarres puede tener una componente vertical importante. Ese hecho, unido a la posible presencia de pilotes inclinados como estructura del duque de alba, hace que puedan originarse esfuerzos de tracción. En esas ocasiones, puede ser conveniente disponer una superestructura pesada en la cabeza del duque de alba que alivie esas tracciones.

El problema de la deformación horizontal es de especial importancia, ya que la energía de atraque o impacto, así como los movimientos de deriva del buque atracado, dependen de la deformabilidad del duque de alba.

En los apartados 3.5.7 y 3.6.9 se dan recomendaciones sobre los procedimientos de estimación de la deformabilidad, debida al terreno, en obras de cimentación superficial y cimentación profunda que deben considerarse en los cálculos. La deformabilidad añadida por la estructura del duque de alba debe sumarse a la debida al terreno de cimentación.

Las acciones horizontales en los duques de alba (particularmente las debidas al atraque) pueden tener un carácter dinámico acusado. A la hora de evaluar su comportamiento deben contemplarse las recomendaciones indicadas en el apartado 3.10.

En los duques de alba pilotados que trabajen fundamentalmente a flexión, es recomendable realizar pruebas de tiro horizontal que permitan una estimación precisa de su deformabilidad.

4.10.2 Instalaciones de botadura e izado

La construcción de buques puede hacerse en gradas, que son rampas de pendiente moderada que ayudan a la botadura por deslizamiento a lo largo de las guías de apoyo. En ocasiones, tienen unos muros laterales y una puerta frontal para evitar la entrada del agua en marea alta. Son entonces similares a los diques secos.

La extracción de embarcaciones fuera del agua, para su reparación en tierra, requiere la construcción de varaderos, que son soleras inclinadas que permiten transportar las embarcaciones, apoyadas en algún sistema de rodadura y mediante tiro desde un cabrestante.

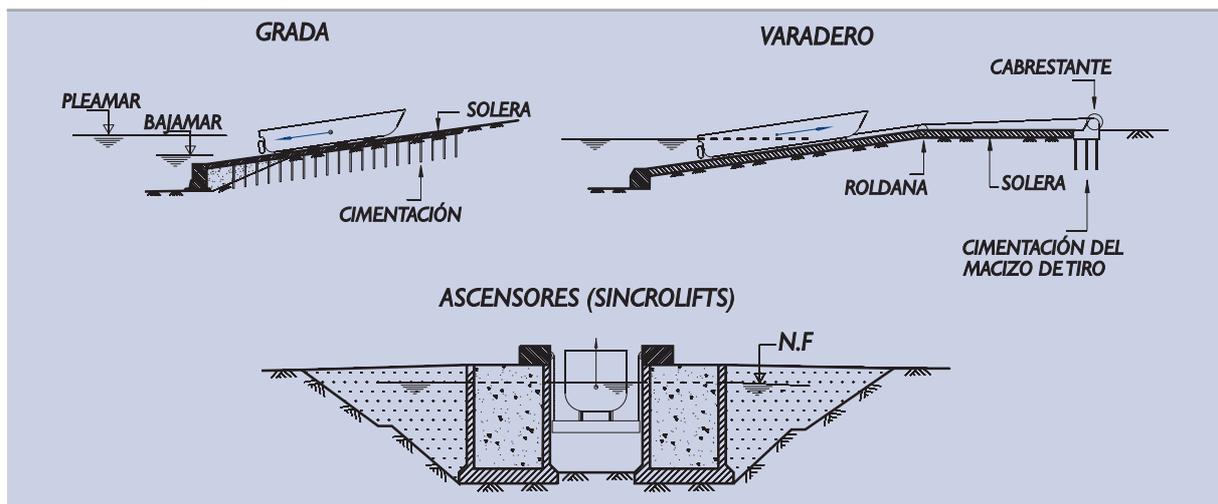
A veces, el izado de embarcaciones se hace verticalmente mediante ascensores (sincrolifts) que levantan la embarcación y la depositan, en un sistema de transporte adecuado, sobre la plataforma de un muelle.

Una función similar la cumplen las instalaciones fijas de fabricación de cajones flotantes. Una plataforma móvil verticalmente (o un flotador) permite soportar el peso del cajón e ir descendéndolo hasta el momento de su botadura.

Los diques flotantes, destinados también a estos menesteres de botadura o de izado, deben considerarse como embarcaciones y no como estructuras fijas.

La Fig. 4.10.2 indica esquemáticamente unas secciones típicas de este tipo de instalaciones.

Figura 4.10.2. Esquemas para instalaciones de botadura e izado



4.10.2.1 Gradas

Como se ha dicho, las gradas pueden tener algunos aspectos comunes con los diques secos, sobre todo cuando disponen de puerta y muros laterales que impiden la inundación parcial en marea alta.

La intensidad de las cargas en las imadas de apoyo de las embarcaciones y, sobre todo, la especial incidencia de las acciones del casco contra la solera, al final de la botadura, hacen que este aspecto sea el dominante en el proyecto de la solera.

Junto a las gradas existirán cimentaciones importantes para las grandes grúas que se utilizan en la construcción naval.

En terrenos firmes la solera puede construirse apoyándola directamente sobre el terreno natural, aunque más frecuentemente, dada la intensidad de las cargas, puede ser necesario la cimentación profunda mediante pilotes.

Los reconocimientos geotécnicos y los análisis de seguridad de estas cimentaciones deben realizarse siguiendo las recomendaciones generales que se indican en las partes 2 y 3 de esta ROM.

El análisis estructural de las soleras requerirá, en general, un estudio de interacción suelo-estructura similar al que se indica en 4.6.3.3, 4.6.4.2 y 4.6.5.2 para las soleras de los diques secos.

4.10.2.2 Varaderos

Las embarcaciones que suelen moverse en los varaderos son más pequeñas y las cargas unitarias, en los apoyos individuales, suelen estar limitadas, de manera que puedan después moverse por tierra.

Las cargas sobre varaderos, tanto de halado longitudinal como transversal, pueden estimarse en la ROM 0.2.

Las soleras de los varaderos pueden estar formadas por losas de hormigón armado con cantos comprendidos entre 0,50 m y 1,00 m, dependiendo de la intensidad de las cargas. Únicamente en terrenos de escasa capacidad portante, puede ser necesario recurrir a cimentaciones profundas.

4.10.2.3 Ascensores y cajoneros

Los ascensores (o sincrolifts) permiten el izado de embarcaciones a expensas de reacciones verticales importantes en el cantil del muelle o en estructuras auxiliares próximas.

Las cargas verticales pueden ser muy excéntricas y por lo tanto pueden tener un efecto desfavorable en el hundimiento y el vuelco de las estructuras de gravedad, o en los pilotes de cimentación, cuando éstas tienen cimentación profunda. Este efecto puede analizarse siguiendo los procedimientos indicados en esta Parte 4 para los distintos tipos de estructuras portuarias.

Las instalaciones fijas destinadas a la fabricación de cajones u otros elementos que después serán botados, y que aquí se denominan cajoneros, pueden estar formadas por dos elementos estructurales similares a los descritos para el caso de los ascensores.

Cada uno de estos elementos ha de soportar cargas semejantes. Las cimentaciones de estas instalaciones han de investigarse siguiendo las recomendaciones aquí indicadas para las obras portuarias a las que más se asemejen.

En cualquier caso, se debe comprobar que los giros de estas estructuras son compatibles con el correcto funcionamiento de la instalación.

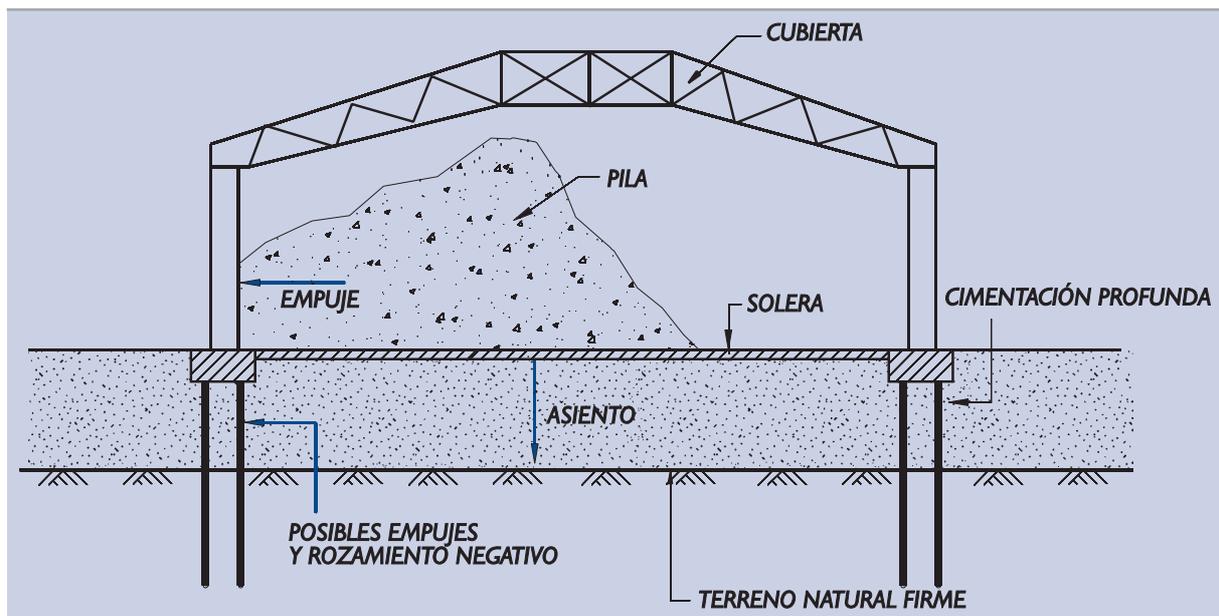
4.10.3 Tinglados, almacenes y parques cubiertos

La manipulación de mercancías en las zonas portuarias exige la construcción de este tipo de instalaciones que, en muchas ocasiones, han de apoyarse sobre terrenos de escasa capacidad portante (rellenos generales realizados en buena parte mediante vertido directo y sumergido).

Las áreas de almacenamiento de las zonas portuarias pueden estar a cubierto, exigiendo entonces estructuras de grandes luces que soporten la cubierta. La Fig. 4.10.3 indica esquemáticamente una sección típica de una construcción de este tipo.

La cimentación de estas estructuras tiene, como aspectos singulares, la gran excentricidad e inclinación de las cargas en la cimentación debido a las acciones del viento sobre la cubierta, y el posible empuje de las cargas almacenadas contra los cerramientos.

Figura 4.10.3. Esquema para un parque de almacenamiento cubierto



El ingeniero debe considerar la alternativa de cimentación profunda, incluso aprovechando la capacidad resistente al arranque de los pilotes, que pudieran ser solicitados transitoriamente a tracción. También son recomendables, en terrenos de buena capacidad portante, la cimentación mediante zapatas o mediante vigas de cimentación corridas, que centren las acciones, bien con su peso añadido o con posibles anclajes profundos.

Otra particularidad de estas estructuras suele ser la compresibilidad del terreno, que asienta bajo las cargas de almacenamiento y puede generar esfuerzos parásitos en las cimentaciones profundas (ver apartado 3.6.3.4). Los esfuerzos de flexión y corte en los pilotes pueden ser determinantes en su proyecto.

El tratamiento de mejora del terreno para reducir los asientos de almacenamiento, o la construcción tardía de las cubiertas y de las soleras (una vez se hayan producido los asientos principales), son medidas que deben contemplarse en estos casos.

La primera carga sobre las soleras de estas estructuras debe realizarse de la manera más lenta posible y controlando sus asientos. Puede ser necesario reconstruir las soleras una vez se haya producido la parte más importante del asiento total esperado.

4.10.4 Emisarios y conducciones submarinas

Las obras de saneamiento pueden exigir el vertido de aguas tratadas o no a distancias considerables de la costa mediante conducciones conocidas con este nombre de emisarios submarinos.

La construcción de oleoductos, gaseoductos y las líneas de transmisión submarinas (energía, telecomunicaciones, etc.) presentan problemas similares.

4.10.4.1 Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento

Los problemas geotécnicos asociados a estas instalaciones son muy variados. En la Tabla 4.10.1 se intenta una síntesis de los más comunes.

Tabla 4.10.1. Problemas geotécnicos y procedimientos de reconocimiento asociados a emisarios o conducciones submarinas (11)

Problema a analizar	Información necesaria	Tipo de reconocimiento
1. Selección del trazado	Perfiles geotécnicos. Localización de obstáculos. Afloramientos rocosos. Riesgos geotécnicos.	Geofísica. Sísmica de reflexión. Muestras representativas y ensayos de identificación.
2. Instalación	Clasificación del terreno. Densidad del terreno. Resistencia al corte.	Muestras inalteradas (vibrocore o sondeos) Ensayos de penetración estática
3. Flotación, hundimiento y deslizamiento transversal	Densidad del terreno. Resistencia al corte Posibilidad de licuefacción por las acciones sobre la conducción	Los indicados en 2. Molinete "in situ". Piezocono. Ensayos SPT.
4 Riesgos geotécnicos	Zonas de riesgo. Resistencia del terreno	Los indicados en 2 y 3. Sísmica de refracción.
5. Deformaciones	Relación tensión-deformación.	Los indicados en 1, 2, 3 y 4. Presiómetros
6. Efectos térmicos	Temperatura del terreno. Conductividad térmica.	Termografías.
7. Efectos dinámicos	Resistencia dinámica del terreno	Los indicados en 1, 2, 3 y 4. Ensayos dinámicos

En la selección del trazado deben examinarse posibles irregularidades geomorfológicas (afloramientos rocosos, cambios de pendiente, etc.) así como la presencia de obstáculos artificiales.

Los riesgos naturales de inestabilidad del fondo marino (erosiones, zonas de arenas móviles, zonas con riesgo de licuefacción más pronunciado, zonas próximas a desniveles potencialmente inestables, etc.) deben ser investigados y representados en una cartografía geotécnica que permita la elección del trazado más seguro.

El estudio de la instalación (operaciones de dragado, colocación de anclajes, obtención de préstamos para la protección de la instalación, etc.) requerirá una serie de estudios específicos de tipo geotécnico sobre los que se dan algunas recomendaciones en otras partes de esta ROM (ver apartado 4.9 para dragados y rellenos).

El estudio de la estabilidad de la conducción en sus distintos modos de fallo (hundimiento, flotación y desplazamiento transversal) requerirá conocer la resistencia del terreno.

Definido un cierto trazado, será necesario precisar la seguridad contra los riesgos geotécnicos de tipo natural antes comentados.

(11) Adaptación de la tabla de Kolk, M.J. y P.T. Power. "Advances in Geotechnical Investigations and Design for Offshore Pipelines". Offshore Oil and Gas Pipeline Technology Conference. Copenhagen. 1983.

El análisis estructural de la conducción exigirá el conocimiento de la reacción del suelo ante las cargas, igual que en otros tipos de problemas de interacción suelo-estructura considerados en esta ROM.

El estudio de los efectos térmicos, que pueden condicionar el proyecto estructural de este tipo de obras, requerirá un conocimiento previo de la variación de temperaturas naturales del fondo marino a lo largo del trazado.

Las acciones externas sobre estas conducciones (oleaje en zonas costeras, corrientes marinas, etc.) tienen carácter dinámico. La alternancia de las acciones puede inducir en el terreno un crecimiento de las presiones intersticiales y su consideración requerirá el estudio del comportamiento dinámico cuando los suelos del fondo marino sean sensibles a estos efectos (ver apartado 3.10).

El reconocimiento geotécnico debe extenderse a lo largo de toda la conducción y debe concentrarse más en las zonas singulares (zonas con ciertas heterogeneidades, zonas de cambios de pendiente, zonas de quiebro en el trazado, etc.).

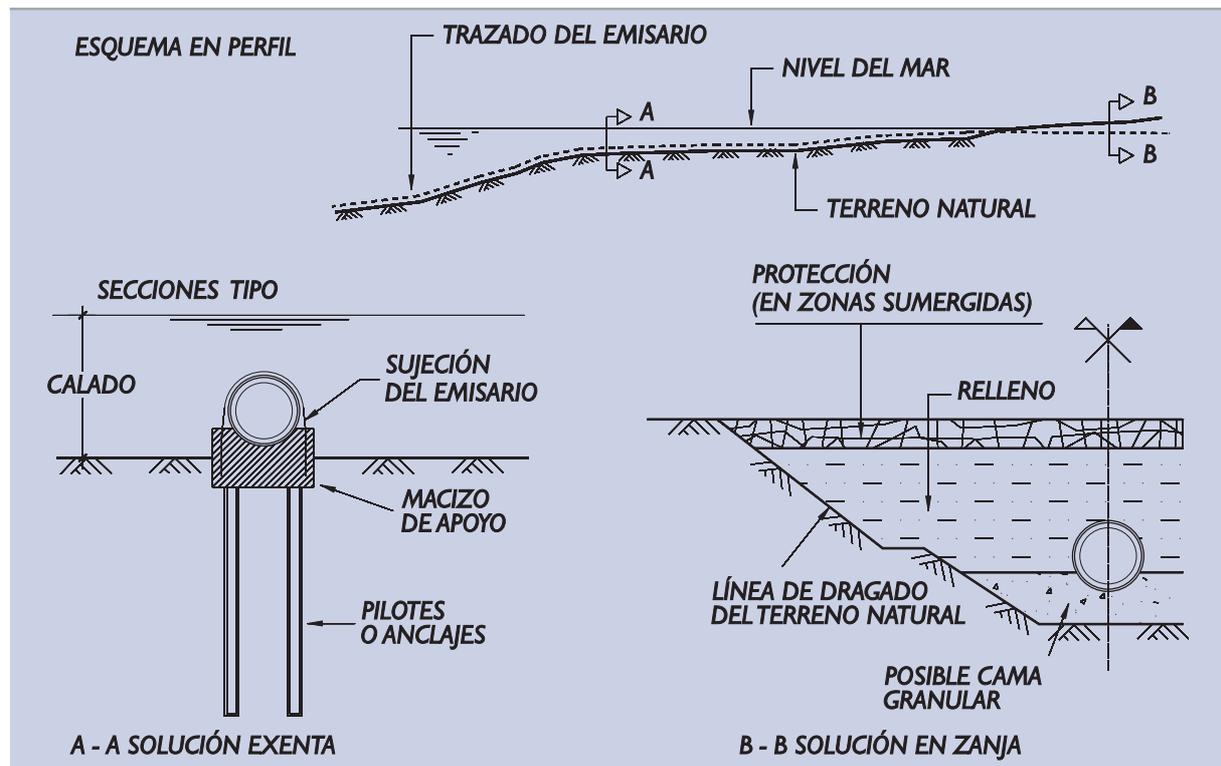
Los procedimientos de reconocimiento geotécnico generales han sido descritos en la Parte 2 de esta ROM. En el caso de estas conducciones submarinas, conviene considerar las recomendaciones relativas a las plataformas marinas (apartado 4.8) en lo que resulten de aplicación.

En la mencionada Tabla 4.10.1, se enumeran algunos procedimientos de reconocimiento geotécnico especialmente indicados para conducciones y emisarios submarinos.

4.10.4.2 Procedimientos de instalación

El apoyo de estas conducciones en el terreno puede hacerse o bien enterradas en una zanja o bien exentas. La Fig. 4.10.4 indica esquemáticamente estos tipos de instalación en un emisario submarino.

Figura 4.10.4. Esquemas sobre instalación de emisarios submarinos



a. Instalación en zanja

La instalación en zanja, o enterrada, puede conseguirse mediante un dragado previo o mediante procedimientos de excavación especiales (lanza de agua, fluidificación del terreno, autoenterramiento, etc.).

La profundidad de estas instalaciones debe ser tal que la conducción quede bajo la máxima profundidad que puedan alcanzar los movimientos naturales de los sedimentos debido a las corrientes, al oleaje o a otras causas. En los apartados 4.7 y 4.8 de esta ROM se dan algunas indicaciones sobre este aspecto.

La ejecución del apoyo en zanja requerirá la realización previa de un dragado o una excavación. Esta fase de la obra debe investigarse y analizarse tal como se indica en el apartado 4.9, de manera que se puedan definir unos taludes de excavación estables durante la construcción, en función del tipo de terreno por donde haya de discurrir el emisario. En ese mismo apartado se indican recomendaciones sobre la ejecución de rellenos estructurales sumergidos.

El relleno posterior debe ir protegido contra las posibles socavaciones o erosiones causadas por las corrientes o por el oleaje. En el apartado 4.2.3.7 se dan recomendaciones para las protecciones en el pie de los muelles que pueden ser de interés en estas instalaciones.

b. Instalación exenta

Las acciones del mar sobre conducciones exentas se salen del alcance de esta ROM. El ingeniero debe investigar las fuerzas de arrastre, a considerar en el proyecto, debidas a corrientes y oleajes, así como otros posibles agentes externos.

La conducción puede quedar simplemente apoyada en el fondo con el lastre necesario para evitar la flotación y soportar las acciones externas.

Los apoyos de la conducción deben ser capaces de recibir las acciones externas, junto con los pesos propios y transmitirlos al terreno.

La transmisión de cargas al terreno puede ser realizada mediante cimentaciones superficiales o mediante cimentaciones profundas. En cualquier caso, deben considerarse las posibles socavaciones y movimientos del terreno del fondo. Las cargas de cimentación han de referirse a profundidades mayores que las de posible afección de estos movimientos.

Las cimentaciones pilotadas o ancladas suelen ser, en general, de mayor interés, particularmente en fondos formados por suelos blandos o donde se esperen socavaciones importantes.

REGISTRO EN EL PROGRAMA ROM

Al objeto de poder tenerle informado de las posibles correcciones, nueva edición, de la publicación de la ROM 0.5-05 y de otras **Recomendaciones para Obras Marítimas y Portuarias**, le agradecemos su registro en el Programa ROM, mediante el envío de la ficha adjunta a:

REGISTRO PROGRAMA ROM
Dirección de Planificación y Desarrollo Portuario
PUERTOS DEL ESTADO
(<http://www.puertos.es>)
Avda. del Partenón, 10. Campo de las Naciones
28042 Madrid (ESPAÑA)

También puede enviar sus comentarios sobre esta publicación ROM 0.5-05, a la siguiente dirección de correo electrónico: programarom@puertos.es

Muchas gracias.

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS

NOMBRE				
DIRECCIÓN				
EMPRESA U ORGANISMO				
DEPT./SECCIÓN				
POBLACIÓN	C.P.	PROVINCIA	PAÍS	
TELÉFONO	FAX	E-MAIL		

REGISTRO PROGRAMA ROM
Dirección de Planificación y Desarrollo Portuario
PUERTOS DEL ESTADO
Avda. del Partenón, 10. Campo de las Naciones
28042 Madrid (ESPAÑA)

 ROM 0.5-05

