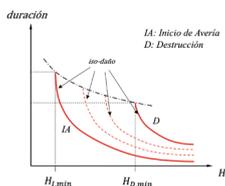


SERIE 1

Obras de abrigo frente a las oscilaciones del mar

RECOMENDACIONES PARA OBRAS MARÍTIMAS



ROM I.I-18

[Articulado]

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

Puertos del Estado



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE FOMENTO



ROM 1.1-18

[Articulado]

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

*Versión imprenta 1.5
30 de octubre 2018*

EDICIÓN:
Puertos del Estado

REDACCIÓN PONENCIA:
*Miguel Á. Losada
Con la colaboración del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales,
Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (IISTA),
Universidad de Granada.*

**COORDINACIÓN Y DISEÑO
DE LA PUBLICACIÓN:**
PUERTOS DEL ESTADO

PREIMPRESIÓN:
Cillero & de Motta

IMPRESIÓN:
Calidad Gráfica Araconsa para Cillero & de Motta

I.S.B.N.:
978-84-88740-11-3

© Puertos del Estado

www.puertos.es/es-es/ROM

Índice General

Preámbulo	15
-----------------	----

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN, MARCO GENERAL Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM I.1-18

1.1 MARCO DE TRABAJO.....	19
1.1.1 Puertos de interés general, legislación vigente.....	20
1.1.2 Dominio público portuario, zona de servicio y articulación urbanística.....	20
1.1.3 El proceso de la planificación portuaria: Análisis y documentos.....	21
1.1.4 Proyectos de Inversión y de Construcción en Puertos.....	22
1.1.5 Objetivos del Programa ROM y MEIPOR.....	23
1.2 DISPOSICIÓN EN PLANTA DEL ÁREA PORTUARIA Y DIQUES DE ABRIGO.....	25
1.3 TAREAS E HITOS A REALIZAR EN EL PROYECTO DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	27
1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y GRADO DE DESARROLLO	29
1.4.1 Grados de desarrollo del proyecto del dique	29
1.4.2 Objetivos y actividades según el grado de desarrollo del proyecto.....	30
1.5 CONTENIDOS Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM I.1-18 POR SECCIONES	38
1.5.1 Organización del documento ROM I.1-18.....	38
1.6 RELACIÓN CON OTRAS RECOMENDACIONES DEL PROGRAMA ROM, INSTRUCCIONES Y NORMAS	41

SECCIÓN II: BASES ESPECÍFICAS PARA EL PROYECTO

2.1 PLANTEAMIENTO GENERAL PARA LA CONCEPCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	45
2.2 ORGANIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL PROYECTO.....	46
2.2.1 Organización temporal: fases de proyecto.....	46
2.2.2 Organización espacial: tramos.....	49
2.3 COMPORTAMIENTO DEL TRAMO POR ESTADOS DE OBRA	51
2.3.1 Espacio muestral y de sucesos.....	51
2.3.2 Modos de fallo y de parada.....	51
2.3.3 Conjunto completo de modos	53
2.3.4 Espacio de sucesos y diagramas de componentes.....	53
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA AVERÍA.....	55
2.4.1 Modelo conceptual del progreso temporal del nivel de daño acumulado.....	57
2.4.2 Curvas de estado del daño medio acumulado	59
2.4.3 Trayectoria del daño acumulado en un ciclo de solicitud.....	63
2.4.4 Dependencia temporal del modelo de probabilidad del daño acumulado	65
2.4.5 Progreso temporal de otras variables acumulativas	68

2.4.6	Niveles de parada operativa y evolución temporal de la parada operativa.....	70
2.5	PROBABILIDAD DE FALLO A UN NIVEL DE AVERÍA AVANZADO	71
2.5.1	Concepciones para el diseño	71
2.5.2	Indicadores de la evolución temporal de la fiabilidad.....	74
2.6	ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LA AVERÍA	76
2.6.1	Árboles de desencadenamiento y propagación	76
2.6.2	Árbol para la toma de decisiones.....	78
2.7	IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE PROYECTO Y COMPONENTES CRÍTICOS.....	78
2.8	VARIANTES EN LA CONCEPCIÓN Y DISEÑO DE UN DIQUE DE ABRIGO	80
2.8.1	Variante 1:Tramos con modos de fallo y de parada independientes y nivel máximo de daño	80
2.8.2	Variante 2:Tramos con modos de fallo y de parada independientes y evolución temporal de la avería	81
2.8.3	Variante 3:Tramos con modos de fallo y de parada concomitantes/dependientes y concatenación de otros modos de fallo	81

SECCIÓN III: PROCEDIMIENTO PARA EL PROYECTO DE DIQUES DE ABRIGO

3.1	CONCEPCIÓN DE LA OBRA Y SECUENCIA DE DISEÑO	85
3.1.1	Herramientas para la concepción de la obra	86
3.1.2	Secuencia lógica de actividades	88
3.2	TIPOLOGÍA Y CRITERIOS PARA SU SELECCIÓN	90
3.2.1	Descripción de una tipología.....	91
3.2.2	Factores técnicos y ambientales para la selección de tipologías.....	91
3.2.3	Factores económicos para la selección de tipologías.....	93
3.3	COMPORTAMIENTO DEL DIQUE Y CONFIGURACIÓN DE DIAGRAMAS.....	93
3.3.1	Diagramas de componentes frente a la seguridad.....	93
3.3.2	Diagramas de componentes frente a la operatividad	99
3.4	MODOS PRINCIPALES DE FALLO Y DE PARADA EN UN DIQUE DE ABRIGO	101
3.4.1	Tramo con alineación recta	102
3.4.2	Tramos con alineaciones no rectas y transiciones	105
3.4.3	Modos principales provocados por otros agentes en el emplazamiento	108
3.4.4	Modos en las fases de construcción, conservación y reparación.....	108
3.4.5	Modos de parada relacionados con las actividades del área portuaria	108
3.5	REPARTO DE LA PROBABILIDAD CONJUNTA DE FALLO Y PARADA EN EL TRAMO	109
3.5.1	Selección de modos principales y no principales.....	109
3.6	ÁRBOLES DE DESENCADENAMIENTO Y PROPAGACIÓN DEL FALLO O PARADA.....	110
3.6.1	Diseño frente a la seguridad (condiciones de trabajo extremas)	111
3.6.2	Diseño frente a la operatividad (condiciones de trabajo operativas normales).....	115
3.6.3	Diseño frente a condiciones de trabajo post-excepcionales	115
3.7	DISEÑO A EVOLUCIÓN DE LA AVERÍA Y ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN	115
3.7.1	Elaboración de estrategias de reparación.....	116
3.7.2	Árbol para la toma de decisiones entre estrategias de reparación.....	117

3.8	ORGANIZACIÓN DE LA OBRA, PROCESOS Y MEDIOS.....	119
3.8.1	Estudios preliminares.....	119
3.8.2	Descripción de las subfases constructivas y procedimientos.....	119
3.8.3	Planificación de la estrategia de construcción.....	119

SECCIÓN IV: VERIFICACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO EN UNA FASE DE PROYECTO

4.1	OBJETIVOS Y REQUISITOS DE PROYECTO DE UN DIQUE EN EL PROGRAMA ROM.....	123
4.1.1	Carácter del tramo en una fase de proyecto.....	124
4.2	PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA VERIFICACIÓN.....	128
4.2.1	Evaluación del comportamiento de un modo.....	128
4.2.2	Ecuación de verificación: planteamiento y formulación.....	130
4.2.3	Verificación integrada de los modos principales de un subsistema.....	132
4.2.4	Métodos de verificación.....	132
4.3	VERIFICACIÓN DE LOS MODOS A ESCALA DE TRAMO Y FASE DE PROYECTO.....	136
4.3.1	Escalas espacio-temporales para la verificación de los requisitos de proyecto.....	136
4.3.2	Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel I.....	138
4.3.3	Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel II y III.....	139
4.3.4	Verificación de condiciones de trabajo excepcionales, CT_3	142
4.4	MÉTODOS DE VERIFICACIÓN Y GRADO DE DESARROLLO DEL PROYECTO.....	148
4.4.1	Métodos de verificación según el grado de desarrollo del proyecto.....	149
4.4.2	Hipótesis de trabajo y simplificaciones según el grado de desarrollo.....	149
4.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD SEGÚN LOS FACTORES DE PROYECTO.....	155

SECCIÓN V: EVALUACIÓN DE COSTES, OPTIMIZACIÓN Y NIVEL DE RIESGO

5.1	CONTEXTO Y ÁMBITO DE LA EVALUACIÓN DE COSTES EN ESPAÑA.....	159
5.2	OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN DE COSTES Y SISTEMA DUAL DE OPTIMIZACIÓN.....	160
5.2.1	Costes de capitalización de un dique de abrigo.....	161
5.3	COSTES EN EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	161
5.3.1	Organización del cálculo de los costes totales.....	162
5.3.2	Cálculo de costes en el Proyecto de Construcción.....	163
5.3.3	Cálculo del descriptor de los costes totales.....	166
5.4	OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN.....	170
5.4.1	Elementos que definen un método de optimización técnico-económica.....	171
5.4.2	Método simplificado de optimización.....	173
5.4.3	Análisis de sensibilidad del diseño del dique.....	174
5.4.4	Secuencia para la optimización y análisis de sensibilidad técnico-económica del coste del dique en el ciclo vital.....	174
5.4.5	Modelo de Optimización recomendado del coste acumulado.....	175
5.5	ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD Y NIVEL DE RIESGO DEL PROYECTO DE INVERSIÓN.....	176

5.5.1	La conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR	176
5.5.2	Adecuación y optimización del Proyecto de Inversión	177
5.5.3	Sistema dual de Optimización y nivel aceptable de riesgo	178
5.5.4	Indicadores de la conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR	178
5.6	CONDICIONES DE TRABAJO EXCEPCIONALES Y EL ANÁLISIS DE ACCIDENTALIDAD	184
5.6.1	Análisis de la accidentalidad	185

ANEJOS

SÍMBOLOS Y DEFINICIONES	189
Símbolos	189
Acrónimos	193
Definiciones	194
COMENTARIOS Y EJEMPLOS	207
Comentarios	207
Ejemplos	207
BIBLIOGRAFÍA	209
Fundamentos teóricos	209
Artículos referenciados	209
Libros referenciados	210
Otros documentos referenciados	211
INDICADORES ECONÓMICO-FINANCIEROS MEIPOR	213
Indicadores financieros y económicos	213
Otros elementos e indicadores	215
Sostenibilidad financiera	217
Nivel de riesgo aceptable	217
REDACCIÓN DE LA ROM 1.1-18	219

Índice de Figuras

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN, MARCO GENERAL Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM I.1-I.18

Figura I.1:	Marco de condicionantes para la toma de decisiones sobre infraestructura portuaria.....	20
Figura I.2:	Esquema de figuras jurídicas para la administración del suelo portuario.....	21
Figura I.3:	Instrumentos de planificación de puertos y requisitos de evaluación ambiental.....	22
Figura I.4:	Esquema de redacción de proyectos de infraestructuras básicas.....	23
Figura I.5:	Integración del dique de abrigo en el área portuaria, puerto de Motril.....	26
Figura I.6:	Esquema de secciones de diques de abrigo y parámetros representativos de las tipologías vertical, mixta o compuesta y en talud.....	26
Figura I.7:	Instrumentos de planificación de puertos y requisitos de evaluación ambiental.....	28
Figura I.8:	Clasificación de proyectos según el carácter de la obra y la magnitud de la inversión.....	29
Figura I.9:	Grados de desarrollo del proyecto ROM I.1-I.18.....	30
Figura I.10:	Cuadro de contenidos de la ROM I.1-I.18.....	39

SECCIÓN II: BASES ESPECÍFICAS PARA EL PROYECTO

Figura 2.1:	Esquema de trabajo para diseñar, verificar y optimizar un dique de abrigo considerando la evolución espacio-temporal de los modos de fallo y de parada.....	46
Figura 2.2:	Jerarquía de escalas temporales del proyecto.....	49
Figura 2.3:	Distribución en cascada del comportamiento de un tramo de dique.....	51
Figura 2.4:	Espacio de sucesos para un conjunto de tres componentes.....	54
Figura 2.5:	Tipologías de diagramas de componentes.....	55
Figura 2.6:	Esquema para evaluar la acumulación de la avería y sus consecuencias.....	56
Figura 2.7:	Curvas de estado del daño medio acumulado. N_s = número de estabilidad asociado a la altura de ola característica del estado de oleaje; d = daño medio acumulado; dur = duración característica del estado de oleaje.....	60
Figura 2.8:	Curvas de iso-duración en función del agente predominante y el daño medio acumulado. I_A = inicio de avería; D = destrucción; H = altura de ola característica del estado de oleaje; H_I = altura de ola característica de I_A ; H_D = altura de ola característica de D ; H_1, H_2 , alturas de ola características de estados de evolución de daño en el intervalo ($I_A - D$).....	61
Figura 2.9:	Curvas de iso-valor del daño medio acumulado en función del agente predominante y la duración. $H_{i,min}$ = altura de ola característica (con duración mínima $t_{i,min}$), necesaria para que se alcance el estado de I_A . $H_{D,min}$ = altura de ola característica (con duración mínima $t_{D,min}$), necesaria para que se alcance el estado de D	62
Figura 2.10:	Curvas de iso-valor característico del agente característico (altura de ola H_1, H_2, \dots), en función de la duración y el daño medio acumulado D . Donde -.-.- es la línea que separa las regiones en las que estados de oleaje característicos, H_1, H_2, H_3 con una duración acotada pueden producir el nivel de avería de destrucción.....	62
Figura 2.11:	Ejemplo de acumulación del daño en un ciclo de sollicitación. Trayectoria del daño (vectores en rojo) en función de la altura de ola característica del estado y su duración correspondientes	

	al ciclo de sollicitación representado por un histograma. No incluye la dependencia del periodo característico	64
Figura 2.12:	Curvas de iso-valor del modelo de ajuste para distintos valores de H y $d_0 = 0$	64
Figura 2.13:	Ensayos de evolución del daño acumulado medido y ajuste	65
Figura 2.14:	Secuencia de estados del ciclo característico analizado	66
Figura 2.15:	Evolución temporal de la probabilidad del daño acumulado considerando para dos pdf del daño inicial, representativas de una estrategia de reparación prudente frente a una estrategia de reparación más atrevida	66
Figura 2.16:	Evolución temporal de la probabilidad del daño acumulado considerando la variabilidad de los agentes	68
Figura 2.17:	Ensayos de acumulación de volumen rebasado. Volumen de agua acumulado en tres tandas de cuatro secuencias de ciclos de olas de igual duración y período, y altura incidente significativa creciente ($H_{i,rms}$). Los resultados del modelo de acumulación se muestran frente al valor medio cuadrático de la altura de ola en el espaldón ($H_{W,rms}$)	69
Figura 2.18:	Funciones de densidad de probabilidad (pdf) del daño acumulado en la vida útil, para dos diseños 1 y 2, con y sin reparación, en este caso, a su vez, con la estrategia de reparar cuando el nivel de avería es IR. IA e IR indican el inicio de avería y el de reparación, respectivamente. F_{fallo} indica máximo fallo admisible. La probabilidad de fallo en la vida útil es el área bajo la correspondiente pdf en el dominio Daño > F_{fallo} . Al incluir la reparación, la forma de la pdf del daño acumulado en la vida útil es diferente en el intervalo Daño > (IR)	73
Figura 2.19:	Ejemplo de árbol de desencadenamiento y propagación	77
Figura 2.20:	Algoritmo de clasificación del coste total por reparación, en función de las estrategias de inicio de reparación y de su duración	79
Figura 2.21:	Importancia relativa de los predictores que definen las diferentes estrategias de reparación	80
Figura 2.22:	Interconexión entre variantes, métodos de verificación y clases de proyectos	82

SECCIÓN III: PROCEDIMIENTO PARA EL PROYECTO DE DIQUES DE ABRIGO

Figura 3.1:	Secuencia general para la concepción y diseño de un dique de abrigo	86
Figura 3.2:	Herramientas y secuencia lógica para la concepción de la obra según la escala de análisis, cómo trabaja y cómo se propaga el fallo	87
Figura 3.3:	Secuencia lógica para la concepción de la obra y su dimensionamiento	89
Figura 3.4:	Tramos en el dique y en el contradique del puerto de Motril	90
Figura 3.5:	Subsistemas de un tramo de dique en talud: (a) perímetro exterior, (b) interior de la sección, (c) cimentación y terreno y (d) elementos de protección, estructurales y materiales de relleno	90
Figura 3.6:	Tipologías de dique habituales (grafismo y nomenclatura tomados de Kortenhaus y Oumeraci, 1998)	91
Figura 3.7:	Izquierda, esquema de tramos del dique. Derecha, esquema de subsistemas de un tramo	97
Figura 3.8:	Diagrama de componentes del dique	97
Figura 3.9:	Diagrama de componentes de cada tramo	98
Figura 3.10:	“Árbol de fallo” (PIANC, 2016) y diagrama de componentes equivalente para excesiva transmisión del oleaje en un dique en talud con espaldón (ROM 1.1-18)	100
Figura 3.11:	“Árbol de fallo” (PIANC, 2016) y diagrama de componentes equivalente para excesivo rebase en un dique vertical, (ROM 1.1-18)	101
Figura 3.12:	Principales elementos y modos agrupados por subsistemas en un dique en talud (imagen adaptada de Burcharth, 1992)	102

Figura 3.13: Árboles de desencadenamiento y propagación del fallo en los tramos de transición y morro.....	112
Figura 3.14: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de los tramos arranque, alineación secundaria y tramo de transición, como consecuencia de deformaciones y movimientos en la cimentación y terreno	113
Figura 3.15: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de los tramos arranque, alineación secundaria y tramo de transición, como consecuencia de erosión y desplazamiento de las piezas del perímetro exterior	113
Figura 3.16: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de la alineación principal, como consecuencia de deformaciones y movimientos en la cimentación y terreno	114
Figura 3.17: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de la alineación principal, como consecuencia de erosión y desplazamiento de las piezas del perímetro exterior	114
Figura 3.18: Ejemplo de árbol de decisiones.....	118
Figura 3.19: Estrategias posibles definidas a partir del árbol de decisiones de la figura 3.18.....	118

SECCIÓN IV: VERIFICACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO EN UNA FASE DE PROYECTO

Figura 4.1: Relaciones entre escalas para la verificación de un dique de abrigo	137
Figura 4.2: Esquema de la estructura	143
Figura 4.3: Esquema de las variables hidrodinámicas de estudio	144
Figura 4.4: Series temporales de superficie libre y fuerza en las regiones definidas y de fuerza total sobre la estructura	144
Figura 4.5: Funciones de distribución de superficie libre, alturas de ola y periodos en las regiones definidas	145
Figura 4.6: Función de densidad y distribución de la fuerza total sobre la estructura	145
Figura 4.7: Pasos ascendentes por cero en la serie temporal de la fuerza total y picos positivos (hacia tierra) y negativos (hacia mar) en cada uno de ellos.....	146
Figura 4.8: Función de distribución de los picos de fuerza hacia tierra y hacia el mar.....	146
Figura 4.9: Funciones de distribución de los valores máximos de altura de ola y de las fuerzas máximas hacia mar y hacia tierra en cada simulación.....	147
Figura 4.10: Función de distribución del valor mínimo del margen de seguridad en cada simulación	148

SECCIÓN V: EVALUACIÓN DE COSTES, OPTIMIZACIÓN Y NIVEL DE RIESGO

Figura 5.1: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de construcción y de desmantelamiento.....	164
Figura 5.2: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de reparación.....	165
Figura 5.3: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de explotación.....	166
Figura 5.4: Caracterización de los agentes climáticos en el emplazamiento y tipología del dique en talud	167
Figura 5.5: Esquema con los datos de entrada necesarios para calcular los costes de reparación mediante simulación numérica de Monte Carlo.....	168
Figura 5.6: Ejemplo de árbol de desencadenamiento y propagación del fallo	169
Figura 5.7: Parámetros de ajuste de la curva potencia de acumulación de daño para el modo de fallo erosión de la berma de pie.....	169
Figura 5.8: Boxplots con los costes de reparación acumulados en cinco años en euros para el modo de fallo erosión de la berma de pie	170
Figura 5.9: Parámetros de ajuste de la curva potencial de acumulación de costes medios de reparación para el modo de fallo erosión de la berma de pie.....	170

Figura 5.10: Secuencia de tareas del proceso de optimización del diseño y dimensionamiento de un dique de abrigo	175
Figura 5.11: Esquema de trabajo seguido en el ejemplo	179
Figura 5.12: Croquis de atraques y dimensiones	180
Figura 5.13: Niveles de servicio frente a productividad anual media	180
Figura 5.14: Variación de los costes totales frente al nivel de avería de diseño	181
Figura 5.15: Evolución temporal de las probabilidades de cumplimiento en función de la toma de decisiones..	181
Figura 5.16: Función de densidad de los costes de reparación para diseño a nivel de Avería	182
Figura 5.17: Función de densidad del TIRF de la Autoridad Portuaria para los tres casos	182
Figura 5.18: Función de densidad del TIRF del Operador para los tres casos considerados.....	183
Figura 5.19: Función de densidad del TIRE para los tres casos considerados	183
Figura 5.20: Resultados del análisis de sensibilidad para situaciones optimista y pesimista.....	184
Figura 5.21: Organigrama de interconexión de las tres herramientas de trabajo	186

Índice de Tablas

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN, MARCO GENERAL Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM I.1-18

Tabla 1.1:	Cuadro resumen de los Estudios Previos.....	32
Tabla 1.2:	Cuadro resumen del Estudio de Alternativas y de Soluciones.....	34
Tabla 1.3:	Cuadro resumen del Anteproyecto.....	36
Tabla 1.4:	Valores orientativos de técnicos, cualificación y número estimado de horas de dedicación al proyecto (España).....	42

SECCIÓN IV: VERIFICACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO EN UNA FASE DE PROYECTO

Tabla 4.1:	Vida útil mínima en función del IRE.....	125
Tabla 4.2:	Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio.....	125
Tabla 4.3:	Operatividad mínima en la fase de servicio.....	127
Tabla 4.4:	Nº medio de paradas anuales en función del ISAO.....	127
Tabla 4.5:	Duración máxima probable de una parada en función del IREO y del ISAO.....	127
Tabla 4.6:	Método de resolución recomendado según el carácter general del tramo.....	148

Preámbulo

Con la redacción de las “Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo”, ROM I.1-18, se completa el marco normativo de Puertos del Estado en materia de infraestructuras marítimas de protección frente a la dinámica marina (fundamentalmente, la acción predominante del oleaje), y se revisan y se amplían los textos publicados ROM 0.0-01 y ROM I.0-09. Sus principales novedades son las siguientes:

1. Integrar las herramientas técnicas (en España, el Programa ROM) con las herramientas de análisis económico y financiero (en España, MEIPOR-16), coordinando, así, el Proyecto de Construcción del dique (u otra infraestructura), con el Proyecto de Inversión del área portuaria y los objetivos de la planificación portuaria, Secciones 1 y 5.
2. Vincular las recomendaciones técnicas (ROM) y económicas (MEIPOR) en un sistema de optimización dual, técnica-económica de la obra sujeta a requisitos de seguridad y operatividad, y económica-financiera de la inversión sujeta a un análisis de sensibilidad y un riesgo aceptable, Secciones 1 y 5.
3. Organizar el proceso de diseño técnico-económico, social y ambiental en grados de desarrollo de complejidad creciente e incertidumbre decreciente, comenzando por los Estudios Previos y finalizando con los Proyectos de Construcción y de Inversión del dique de abrigo, considerando el nivel de cualificación necesario de los intervinientes y unos tiempos de ejecución mínimos, Secciones 1 y 2.
4. Jerarquizar el dique en el espacio, en tramos, subsistemas y modos de fallo y operativos, para su integración con la descripción temporal por estados, ciclos de solicitud, años y plurianual de la vida útil de servicio y financiera-económica de la infraestructura, Secciones 2 y 3.
5. Unificar los estados límite últimos y de servicio para la verificación de los modos de fallo y adecuar los criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo, Secciones 3 y 4.
6. Incorporar, con carácter general, la evolución del daño y las estrategias de reparación y el análisis de costes en el modelo de diseño técnico-económico de los diques de abrigo como los tres elementos necesarios para formular y resolver el sistema dual de optimización técnica-económica (ROM) y económico-financiera (MEIPOR), Secciones 4 y 5.

Este planteamiento refuerza e impulsa (con sus especificidades) la ingeniería de la conservación y reparación, readaptación y desmantelamiento de las obras marítimas y portuarias. Así mismo, incrementa la relevancia de la experimentación para verificar los Proyectos de Construcción e Inversión (cualquiera que sea su modalidad), y traza nuevas líneas de investigación básica en las que apoyarse para revisar las Recomendaciones actuales y elaborar futuras. El prestigio internacional del Programa ROM es una motivación adicional, nada desdeñable, para alcanzar estos objetivos.

La metodología aplicada en la ROM I.1-18 está descrita en la **ROM 0.0-01** y su fundamento se encuentra en numerosos libros de fiabilidad, teoría de riesgo y artículos técnicos. Los más relevantes se citan en los diferentes documentos de esta ROM y se referencian en un Anejo de este Articulado.

Para aplicar la ROM I.1-18 es conveniente que el ingeniero conozca las Recomendaciones del Programa ROM afines a ella, en particular: **ROM 1.0-09**, **ROM 2.0-11**, **ROM 3.1-99** y **ROM 0.5-05**. Además, para su aplicación en España, debe conocer el “*Método para la Evaluación de Inversiones Portuarias*”, **MEIPOR-16**, que es el documento de Puertos del Estado para analizar la rentabilidad económica y financiera de la inversión en el ámbito portuario. Con generalidad, la aplicación de la ROM I.1-18 fuera de España deberá vincularse con el método de evaluación de inversiones allí en vigor y que, presumiblemente, no diferirá de lo dispuesto en **MEIPOR-16** o en la “*Guía de Análisis Coste-Beneficio de la Unión Europea*” (**CE, 2002**) en la que se apoya.

La ROM I.1-18 se escribe para su aplicación por ingenieros con experiencia suficiente, o bajo la dirección técnica de ingenieros “senior” con amplia experiencia en el campo de las obras marítimas y portuarias, ingeniería de costas y estructuras *offshore*. No es un texto para aprender; es un texto para guiar la aplicación de una metodología de proyecto que, obviamente, debe ser conocida por quien la utiliza. A tal efecto, es conveniente que, para utilizar esta ROM I.1-18 y **MEIPOR-16**, el ingeniero tenga nociones básicas sobre métodos estadísticos y numéricos, fiabilidad y riesgo, macroeconomía y ecología litoral, así como nociones específicas en ingeniería marítima, portuaria y de costas, construcción e ingenierías del terreno, de los materiales y atmosférica.

El texto de la ROM I.1-18 está escrito teniendo en cuenta otras Recomendaciones del Programa ROM, procurando evitar repeticiones o duplicidades con aquellas, y se organiza en dos documentos, “*Articulado*” y “*Manual para el diseño de diques de abrigo y de ayuda a la aplicación del Articulado de la ROM I.1-18*” y tres subdocumentos, “*Anejos de especificaciones técnicas generales para el proyecto*”, “*Anejos para la caracterización de las oscilaciones del mar*” y “*Ejemplos*”. El Manual y los tres subdocumentos se pueden descargar de la web de Puertos de Estado y son “elementos vivos” sometidos a permanente revisión y adecuación mediante un procedimiento reglado que le confiere validez técnica y actualidad.

COMENTARIO

Todas las denominaciones contenidas en estas Recomendaciones referidas a personas y órganos de gobierno unipersonales se entenderán realizadas y se utilizarán indistintamente en género masculino o femenino.

Índice Sección I

SECCIÓN I: INTRODUCCIÓN, MARCO GENERAL Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM 1.1-18

I.1	MARCO DE TRABAJO.....	19
I.1.1	Puertos de interés general, legislación vigente.....	20
I.1.2	Dominio público portuario, zona de servicio y articulación urbanística.....	20
I.1.3	El proceso de la planificación portuaria: Análisis y documentos.....	21
I.1.4	Proyectos de Inversión y de Construcción en Puertos.....	22
I.1.5	Objetivos del Programa ROM y MEIPOR.....	23
I.2	DISPOSICIÓN EN PLANTA DEL ÁREA PORTUARIA Y DIQUES DE ABRIGO.....	25
I.3	TAREAS E HITOS A REALIZAR EN EL PROYECTO DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	27
I.4	CLASIFICACIÓN DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y GRADO DE DESARROLLO.....	29
I.4.1	Grados de desarrollo del proyecto del dique.....	29
I.4.2	Objetivos y actividades según el grado de desarrollo del proyecto.....	30
I.5	CONTENIDOS Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM 1.1-18 POR SECCIONES.....	38
I.5.1	Organización del documento ROM 1.1-18.....	38
I.6	RELACIÓN CON OTRAS RECOMENDACIONES DEL PROGRAMA ROM, INSTRUCCIONES Y NORMAS.....	41

1. Introducción, marco general y organización de la ROM 1.1-18

Todo dique de abrigo, en su conjunto y en cada uno de sus tramos, partes y elementos, deberá cumplir los objetivos de proyecto definidos por el promotor y exigidos por la normativa vigente. La ROM 0.0-01 concreta estos objetivos mediante unos requisitos de proyecto frente a la seguridad estructural y la operatividad de la infraestructura que deben satisfacerse a lo largo de las distintas fases por las que transita la obra. En esta ROM 1.1-18 se incorporan en los planteamientos de la ROM 0.0-01 la variabilidad espacio-temporal del proyecto en la concepción, el diseño, el dimensionamiento, la verificación y la optimización del dique. Este desarrollo se apoya, además, en el Método de Evaluación de Inversiones en Puertos (MEIPOR) cuyo objetivo general es evaluar desde un enfoque económico-financiero, la generación de valor de un proyecto de inversión bajo la consideración del binomio rentabilidad/riesgo.

En esta sección se presenta el marco general de la presente ROM 1.1-18 y su conexión con MEIPOR. Su objetivo es pautar la elaboración de los estudios y el correspondiente proyecto, considerando el proceso de toma de decisiones en sus dos modalidades: Proyecto de Inversión y Proyecto de Construcción de un dique de abrigo u otra infraestructura portuaria. Esta introducción se inicia y progresa apoyándose en el marco legal vigente y en las recomendaciones y conclusiones que se recogen en la planificación portuaria; finaliza con la organización del Proyecto de Construcción por grados de avance o desarrollo concretando las actividades principales (tareas e hitos) a realizar en cada uno de ellos.

1.1 MARCO DE TRABAJO

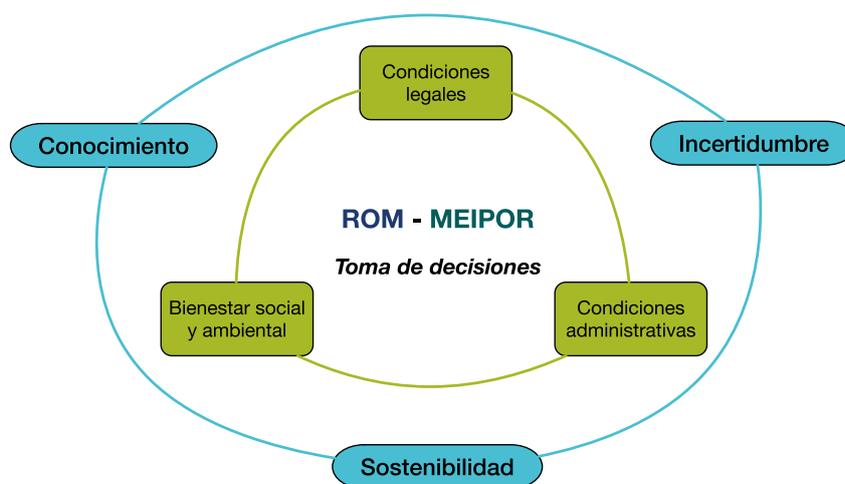
Los puertos marítimos son nodos integrados en redes de transporte, logística y comercio cuya función principal es permitir la transferencia de mercancías y pasajeros entre los modos de transporte marítimo y terrestre (carretera, ferrocarril y vías navegables), en condiciones de eficiencia y seguridad.

Desde su origen como refugio de buques hasta su actual desempeño comercial, industrial, logístico, pesquero, náutico-deportivo o militar, los puertos albergan en su zona de servicio infraestructuras relacionadas con (a) el control de las oscilaciones del mar (diques y estructuras marítimas), (b) la seguridad y la operatividad marítima del área y del buque (muelles y atraques), (c) el uso y la explotación terrestre del área y (d) la accesibilidad de los modos de transporte terrestre.

Sea cual fuere la infraestructura portuaria, la toma de decisiones en materia de inversión debe basarse en la generación de valor y someterse a mecanismos de gestión y control que garanticen la consecución de los debidos fines de interés general.

Para ello, las correspondientes recomendaciones técnica-económicas y económico-financieras deben incluir en la toma de decisiones las necesidades de bienestar social y ambiental y los condicionantes tanto legales como administrativos en la zona de servicio, considerando, entre otros, el estado del conocimiento, los requisitos de sostenibilidad y de adaptación al calentamiento global y el carácter aleatorio de los procesos y los factores de proyecto que intervienen.

Figura 1.1: Marco de condicionantes para la toma de decisiones sobre infraestructura portuaria



1.1.1 Puertos de interés general, legislación vigente

En España, la regulación en la que se enmarca el proyecto, construcción, conservación, reparación y desmantelamiento de infraestructuras marítimas y portuarias es el “Texto refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante” aprobado por el RD Legislativo 2/2011 de cinco de septiembre de 2011.

En este marco regulatorio se define puerto marítimo como el “conjunto de espacios terrestres, aguas marítimas e instalaciones que, situado en la ribera de la mar o de las rías, reúna condiciones físicas, naturales o artificiales y de organización que permitan la realización de operaciones de tráfico portuario, y sea autorizado para el desarrollo de estas actividades por la Administración competente”.

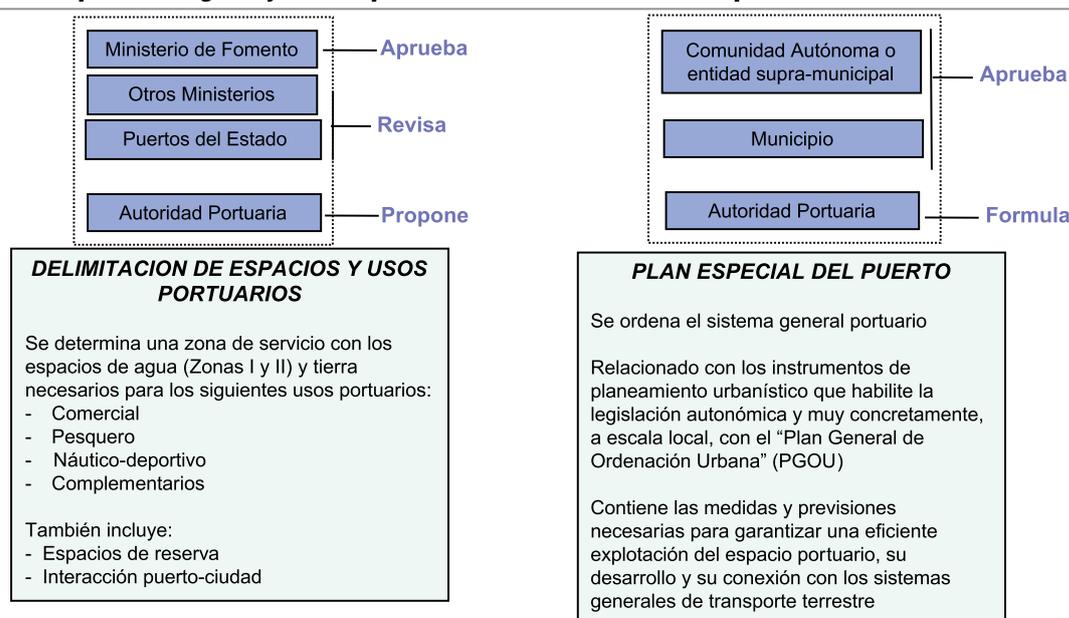
Entre los regímenes recogidos en este marco regulatorio destacan a efectos de la presente ROM los de planificación y construcción de los puertos de interés general, los presupuestario y económico y el relacionado con el dominio público.

1.1.2 Dominio público portuario, zona de servicio y articulación urbanística

En España, los puertos de interés general son de titularidad estatal, forman parte del dominio público marítimo-terrestre (DPMT) e integran el dominio público portuario estatal (DPPE). Tienen adscrita una zona de servicio que incluye los espacios de tierra y agua necesarios para el desarrollo de los usos portuarios (comerciales, pesqueros, náutico-deportivos y complementarios o auxiliares de los anteriores), los espacios de reserva y los de interacción puerto-ciudad. Esta zona de servicio viene determinada a través de una Orden Ministerial de Delimitación de Espacios y Usos Portuarios. Además, la zona de servicio, junto con el dominio público portuario afecto al servicio de señalización marítima, debe ser calificada como sistema general portuario en los planes generales de ordenación

urbanística o similares que apruebe la correspondiente administración urbanística. El sistema general portuario se desarrolla a través de un plan especial o instrumento equivalente en el que se establecen las medidas y previsiones necesarias para garantizar una eficiente explotación del espacio portuario, su desarrollo y su conexión con los sistemas generales de transporte terrestre. El Plan Especial del Puerto se integra en el Plan General de Ordenación Municipal como un Área de Planeamiento Remitido.

Figura 1.2: Esquema de figuras jurídicas para la administración del suelo portuario



1.1.3 El proceso de la planificación portuaria: Análisis y documentos

En España, de acuerdo con la legislación vigente, Puertos del Estado, en colaboración con las Autoridades Portuarias, es el responsable de elaborar el Marco Estratégico del Sistema Portuario de Interés General, que podrá ser desarrollado a través de los Planes Estratégicos y Planes Directores de Infraestructuras y que será ejecutado a través de los Planes de Empresa.

El Plan Estratégico es potestativo de la Autoridad Portuaria e incluye, al menos, un análisis y diagnóstico de la situación, la definición de las líneas y objetivos estratégicos, los criterios de actuación y el plan de acción. El Plan Estratégico no requiere evaluación ambiental.

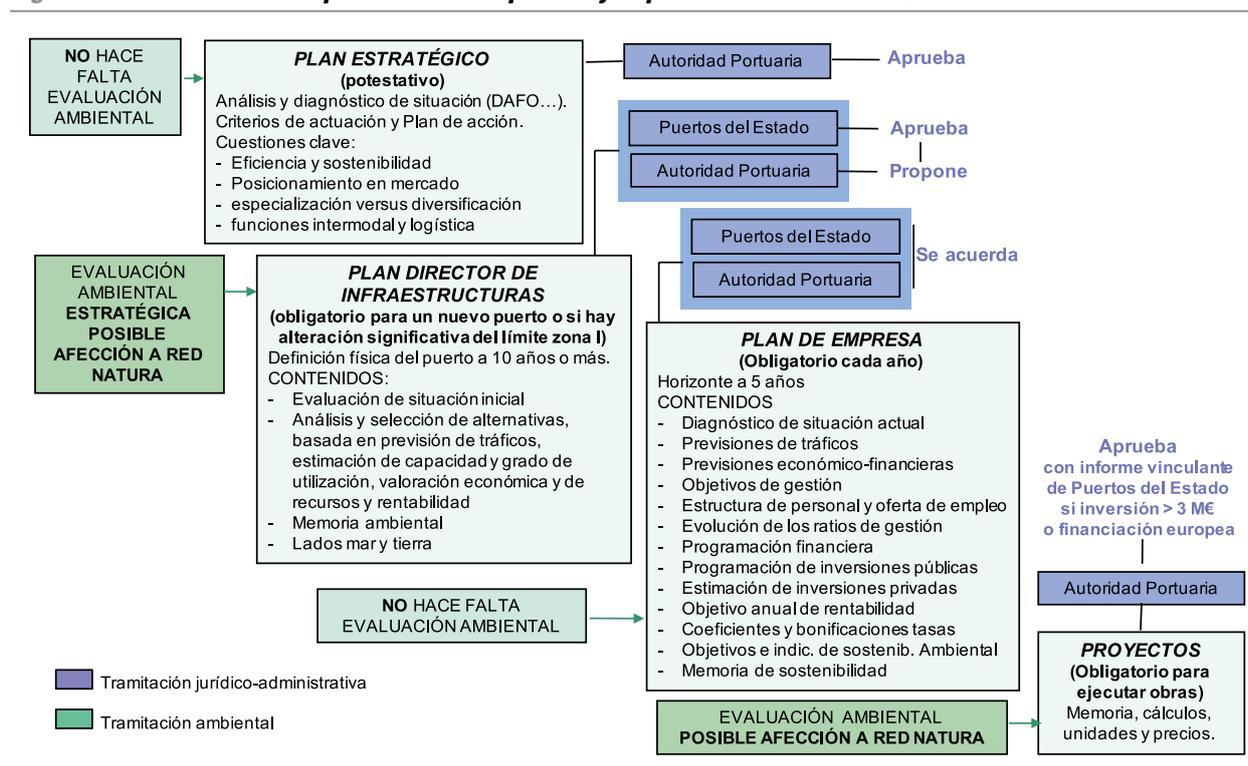
El Plan Director de Infraestructuras es obligatorio cuando se acomete la construcción de un nuevo puerto de titularidad estatal, o la ampliación o realización de nuevas obras de infraestructura de uno existente que supongan una modificación significativa de sus límites físicos exteriores en el lado marítimo. Este Plan incluye la evaluación de la situación inicial del puerto en el momento de su redacción y la definición de las necesidades de desarrollo del puerto con un horizonte temporal mínimo de 10 años. Para ello, se analizan distintas alternativas de desarrollo, se selecciona la más adecuada, teniendo en cuenta la previsión de tráfico, la estimación de la capacidad de las infraestructuras e instalaciones, así como su grado de utilización en cada una de las fases de desarrollo, la valoración económica de las inversiones y los recursos, y la rentabilidad financiera y económica. Lo anterior incluye no solo las actuaciones del lado mar, sino también las del lado tierra, particularmente la red viaria y ferroviaria de la zona de servicio, que deben ser coherentes con los accesos terrestres actuales y previstos.

El Plan Director requiere evaluación ambiental estratégica así como, en su caso, la evaluación de las posibles afecciones a la RED NATURA. Finalmente es aprobado o ratificado tras alcanzarse mutuo acuerdo por Puertos del Estado y la Autoridad Portuaria. Si el puerto es de nueva construcción debe ser aprobado por el Ministro de Fomento.

El Plan de Empresa se elabora anualmente e incluye, al menos, un diagnóstico de situación, las previsiones de tráfico portuario, las previsiones económico-financieras, los objetivos de gestión, los objetivos e indicadores de sostenibilidad ambiental del puerto, la estructura de personal y oferta de empleo, la evolución de los ratios de gestión, la programación financiera, la programación de inversiones públicas, la estimación de inversiones privadas, el objetivo anual de rentabilidad y los coeficientes correctores y bonificaciones de las tasas que correspondan.

El Plan de Empresa no requiere por sí mismo evaluación ambiental y es aprobado de mutuo acuerdo por Puertos del Estado y la Autoridad Portuaria.

Figura 1.3: Instrumentos de planificación de puertos y requisitos de evaluación ambiental



1.1.4 Proyectos de Inversión y de Construcción en Puertos

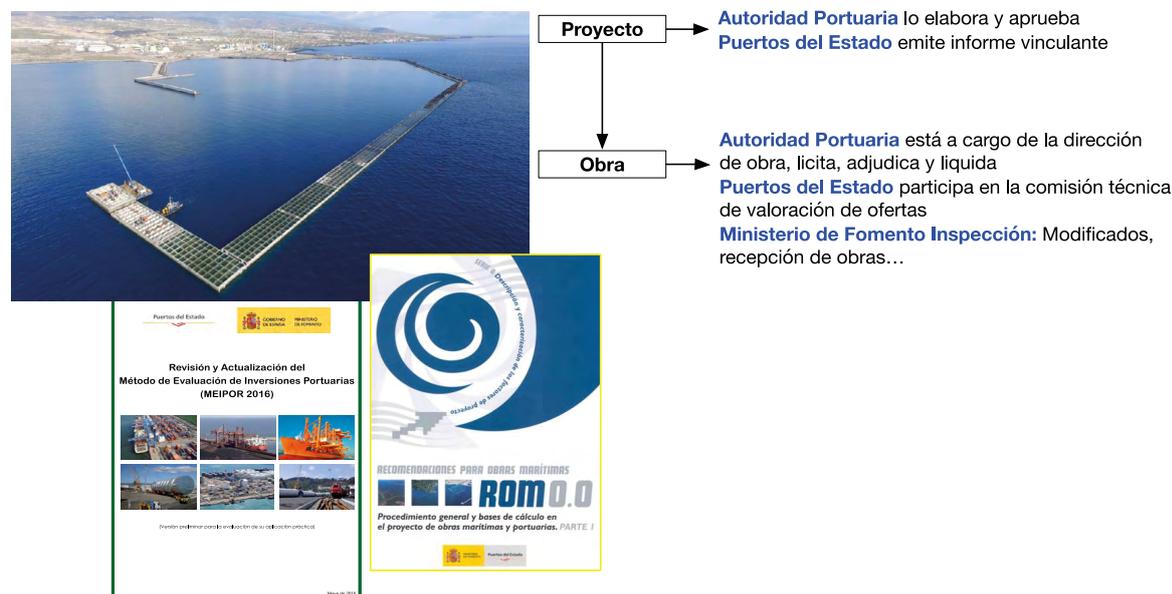
La programación de inversiones públicas integrada en el Plan de Empresa recoge el desarrollo de una serie de Proyectos de Inversión en infraestructuras portuarias de los que se deriva a su vez los correspondientes Proyectos de Construcción de las mismas.

En el sistema portuario de titularidad estatal, el Proyecto de Construcción con sus estudios complementarios es prescriptivo tanto para la ejecución de un nuevo puerto como para la ejecución de nuevas obras de infraestructura o ampliación de un puerto existente, en cuyo caso es aprobado por la Autoridad Portuaria con informe vinculante, en su caso, de Puertos del Estado. La aprobación de un Proyecto de Construcción conlleva la declaración de utilidad pública y necesidad de ocupación de los bienes y adquisición de derechos, a los fines de expropiación forzosa y ocupación temporal.

Un Proyecto de Construcción se redacta conforme al Proyecto de Inversión con el que entronca y debe ser consecuente con el Plan Director de Infraestructuras que lo propone y aprueba.

Además, los Proyectos de Construcción están sujetos al procedimiento de evaluación de impacto ambiental de acuerdo con la legislación aplicable.

Figura 1.4: Esquema de redacción de proyectos de infraestructuras básicas



1.1.5 Objetivos del Programa ROM y MEIPOR

Desde su creación en 1987, el objetivo principal del Programa de Recomendaciones de Obras Marítimas y Portuarias (ROM) es proporcionar un conjunto de normas y criterios técnicos de aplicación en el proyecto, construcción, explotación, conservación, reparación y desmantelamiento de todas las obras marítimas y portuarias, cualquiera que sea su clase o destino y cualesquiera que sean los materiales, medios y elementos empleados.

En España, el Método de Evaluación de Inversiones Portuarias (MEIPOR) es un instrumento destinado a facilitar la toma de decisiones en materia de Proyectos de Inversión en los puertos de interés general. El objetivo general de MEIPOR es medir la generación de valor de un proyecto y su viabilidad económico-financiera sobre la base de criterios de evaluación del binomio rentabilidad/riesgo.

ROM y MEIPOR son dos herramientas concomitantes que deben complementarse para dar un soporte técnico-económico y económico-financiero a la toma de decisiones en los desarrollos de las áreas portuarias y de sus infraestructuras. Los objetivos generales de la aplicación conjunta a los puertos del binomio ROM-MEIPOR son,

- establecer la necesaria e ineludible conexión técnica, social, ambiental, financiera y económica entre los planes, los proyectos y los instrumentos que puedan existir para la ordenación, gestión y explotación de las infraestructuras portuarias,
- optimizar todo el ciclo asociado a la obra portuaria de forma que se coordinen los correspondientes Proyectos de Inversión y de Construcción, y
- proporcionar la documentación y el soporte técnico, ambiental, financiero y económico necesario para tomar decisiones durante la implementación, el desarrollo y la gestión de los Proyectos de Inversión en la zona de servicio del puerto.

Objetivos específicos y método ROM 1.1-18

En este contexto, la ROM 1.1-18 es la herramienta técnico-económica de ayuda y soporte para la toma de decisiones en materia de Proyectos de Inversión de diques de abrigo. Cuenta con la ventaja de incorporar la incertidumbre al proceso de diseño y la verificación de los requisitos de proyecto y también al análisis de costes necesario

para la evaluación de la rentabilidad económico-financiera. De esta manera los resultados ganan en rigor y su interpretación gana igualmente en objetividad, cuando menos con la aproximación empírica pura o heurística.

Uno de sus objetivos específicos es dotar al ingeniero marítimo de un método útil y eficaz para proyectar, construir, conservar, reparar y dismantelar un dique de abrigo cuya finalidad es, esencialmente, proteger un área portuaria de los agentes climáticos cumpliendo un conjunto de requisitos técnicos, económicos, sociales y ambientales especificados previamente.

Siguiendo la ROM 0.0-01 y la ROM 1.0-09, el método se basa en un proceso de optimización del diseño y gestión de una obra de abrigo sobre la base de cumplimiento de unos requisitos de proyecto, cuantificados por medio de unos niveles aceptables de riesgo formal y estructural de dicha infraestructura. En puridad, por el hecho de haberse incorporado la incertidumbre al proceso, el riesgo se calcularía mediante el producto de la probabilidad del incumplimiento de tales requisitos y las consecuencias ocasionadas. Sin embargo, el método ROM no conlleva el cálculo directo de este tipo de riesgo, si no que impone un límite o umbral para la probabilidad conjunta de fallo o parada operativa en la vida útil del dique de abrigo.

Los umbrales de seguridad y de operatividad que se establecen en la presente ROM dependen del carácter o importancia del dique de abrigo, dentro de una cierta área portuaria, vista desde una perspectiva económica, y también desde una perspectiva social y ambiental. El carácter o importancia se estima en función de las consecuencias previsibles que se derivarían del incumplimiento de los objetivos del propio dique. A efectos de la presente ROM, el carácter se ha categorizado a través de una colección discreta de intervalos de variación de unos indicadores económico y socio-ambiental conocidos como IRE e ISA, los cuáles, aun estando relacionados justamente con las consecuencias de un modo de fallo pésimo, son, sin embargo, de sencillo cálculo.

En suma, con estas premisas, se plantea que las dimensiones y propiedades del dique de abrigo objeto de proyecto sean fruto de una optimización técnico-económica sujeta a una serie de restricciones o condiciones de contorno prefijadas.

EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

El resultado final de este proceso metodológico debe ser un Proyecto de Construcción (en España coherente con el Plan Director de Infraestructuras) cuya Memoria y otros documentos define y determina las dimensiones de los tramos, partes y elementos del dique, las características de los materiales de construcción para que conserven la geometría y sus cualidades resistentes, los procedimientos y medios necesarios para su construcción, conservación y, en su caso, reparación.

Uno de sus Anejos debe contener los cálculos acreditativos de que la probabilidad de ocurrencia de averías que comprometen sus fines está acotada en la vida útil y en otras fases de proyecto.

El Proyecto de Construcción debe incluir una estimación cuantitativa de la operatividad del área portuaria directamente condicionada por la presencia del dique, así como una valoración cuantitativa adicional de las consecuencias de un posible incumplimiento de los límites admisibles de operatividad por la pérdida temporal o definitiva de los atributos estructurales del dique, así como de los costes de reparación.

Además, según la localización y el entorno administrativo en los que se encuentre el área portuaria, el Proyecto de Construcción debe atender a las figuras legales de protección ambiental y de ordenación territorial, incluyendo todos los aspectos relacionados con la calidad de las aguas y los ecosistemas litorales, así como con los procesos morfodinámicos y de evolución de la unidad fisiográfica litoral.

El documento Anejos de Especificaciones Técnicas Generales para el Proyecto (Artículo 1.5 de esta Sección) incluye un índice general de los contenidos de un Proyecto de Construcción. Éste es un documento vivo que, tal y como se indica en el preámbulo a este Articulado, está sometido a permanente revisión y adecuación mediante un procedimiento reglado que le confiere validez técnica y actualidad.

Implicaciones de la aplicación del binomio ROM 1.1-18-MEIPOR

La coordinación de objetivos y métodos del binomio ROM 1.1-18-MEIPOR conlleva formas diferentes de evaluación del riesgo, aunque no por ello incompatibles, así como la asunción de nuevos métodos y herramientas a emplear.

EVALUACIÓN DEL RIESGO

Con el binomio ROM 1.1-18.-MEIPOR se enlazan de manera acotada dos concepciones de riesgo,

- (a) riesgo del Proyecto de Construcción frente a la seguridad y la operatividad de la infraestructura recogido en el Programa ROM, y
- (b) riesgo del Proyecto de Inversión asociado a la variabilidad de la demanda y los costes de la inversión, entre otros, y la rentabilidad financiera y económica, recogido en MEIPOR.

La conexión de los riesgos de valoración de los costes de inversión y de la rentabilidad financiera y económica con el riesgo de la infraestructura (seguridad estructural y operatividad) se efectúa por medio del sistema dual de optimización técnico-económica (Programa ROM) y económico-financiera (MEIPOR) sujetas a un conjunto de restricciones simultáneas y de compatibilidad.

NUEVOS MÉTODOS Y HERRAMIENTAS

La consecución de los objetivos concomitantes del riesgo, obliga a ampliar el método de trabajo propuesto en la ROM 0.0-01. Se añade el análisis de la evolución espacio-temporal de los modos de fallo y la verificación global y jerarquizada (espacial) por tramos, subsistemas y elementos, y se incorpora como soporte para la toma de decisiones los diagramas de componentes, los árboles de desencadenamiento y propagación y los árboles de decisión.

Con carácter general, ambos planteamientos, técnico-económico y financiero-económico, se formulan desde la caracterización del incumplimiento de los objetivos de proyecto mediante modos de fallo y de parada operativa el primero, y de los objetivos de rentabilidad económica y financiera y sostenibilidad financiera del área portuaria el segundo.

Las nuevas herramientas ayudan a calcular la información necesaria para la optimización técnico-económica del dique y para evaluar la rentabilidad económica y financiera del Proyecto de Inversión. Esencialmente, las funciones de probabilidad de la infraestructura frente a la seguridad y la operatividad y de los costes totales de Proyecto de Construcción y su distribución en las diferentes fases de proyecto.

Esta dualidad de lo técnico y lo económico en el planteamiento y formulación del diseño del dique y sus tramos (aplicable a cualquier otra infraestructura portuaria) forma parte de los objetivos específicos de la ROM 1.1-18 y se va concretando a medida que se avanza en el desarrollo del proyecto.

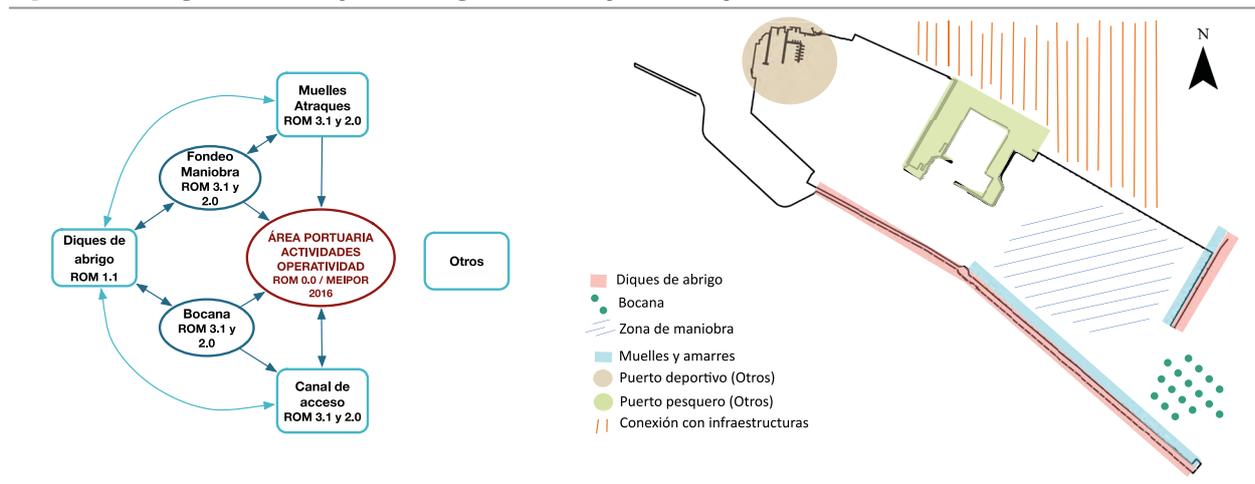
1.2 DISPOSICIÓN EN PLANTA DEL ÁREA PORTUARIA Y DIQUES DE ABRIGO

El Plan Director de Infraestructuras es el documento de planificación portuaria que, por lo general, posee el alcance necesario, por ejemplo, para determinar la necesidad, o no, de construir un dique de abrigo o de prolongar, de manera sustancial, uno ya existente. Este análisis incluye el encaje de ambas soluciones en el resto del área portuaria con una perspectiva temporal a futuro de, al menos, 10 años. Si finalmente se concluye acometer el abrigo del área portuaria, el Plan Director debe recoger las diferentes configuraciones para el mismo, seleccionar y recomendar la más adecuada. Las conclusiones y recomendaciones del Plan Director son el punto de partida de un proyecto de un dique de abrigo.

La forma en planta de un área portuaria construida en aguas abiertas, o poco protegidas, depende principalmente del área que se pretende abrigar, la dinámica marina, la batimetría del fondo y los accesos terrestres. Además pueden influir otros condicionantes locales tales como el terreno y los medios y materiales de construcción y económicos.

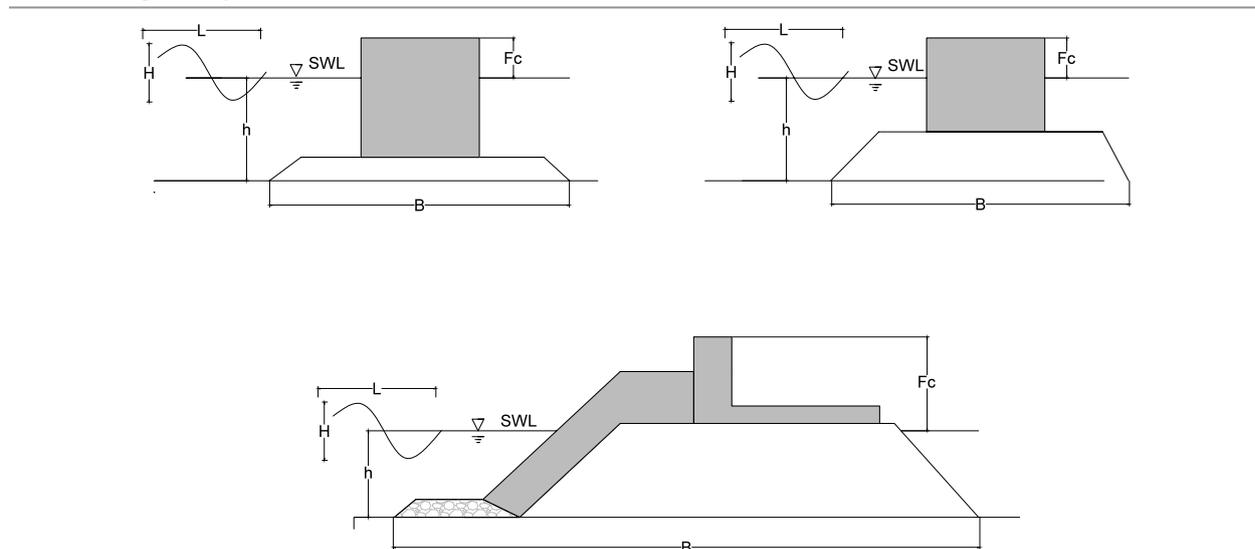
Sus dimensiones dependen, entre otros, del carácter general y carácter operativo del área, la intensidad de tráfico y tipología de buques esperados, los niveles exigidos de calidad del servicio, los agentes climáticos atmosféricos y marinos locales y las características del suelo y del terreno.

Figura 1.5: Integración del dique de abrigo en el área portuaria, puerto de Motril



Esta ROM se dedica al proyecto de los diques de abrigo de un área portuaria (Puerto Marítimo) o del litoral frente a la acción predominante del oleaje. Una sección tipo suele estar formada por un núcleo de materiales sueltos, protegido con capas y mantos de elementos granulares sobre los que puede descansar una superestructura de hormigón en masa o armado. Tradicionalmente, estos diques se construyen con tipología vertical, mixta o compuesta y en talud (o de escollera), (véase figura 1.6). Su resistencia frente a la acción del oleaje proviene, principalmente, del peso de sus elementos coadyuvado por el de los elementos próximos a través de mecanismos de fricción y trabazón. En algunos textos estas obras marítimas se agrupan bajo el epígrafe de “diques de gravedad”.

Figura 1.6: Esquema de secciones de diques de abrigo y parámetros representativos de las tipologías vertical, mixta o compuesta y en talud



Cuando se construye para abrigar un área portuaria, el dique debe de satisfacer unas condiciones bastante restrictivas frente a la transmisión del oleaje, bien por rebase de la coronación, bien por propagación a través de la sección. En estos casos, la altura relativa, $(h + Fc)/H$, del dique suele tener dimensiones de orden $1, O(1)$, y la anchura relativa, B/L , del dique del orden de $1/10, O(1/10)$; h es la profundidad en el emplazamiento y H, L, Fc, B son, respectivamente, una altura y una longitud de ola características, el francobordo y una magnitud representativa de la anchura del dique.

COMENTARIO

En esta ROM no se aborda específicamente el proyecto de “estructuras marítimas fijas o flotantes”, “estructuras offshore” o “espigones costeros”. No obstante, el diseño de estas tipologías se puede abordar, sin excepciones, con la metodología desarrollada en esta ROM 1.1-18. Los espigones costeros (transversales, oblicuos o paralelos a la costa) suelen construirse con los mismos materiales y con tipología geoméricamente similar a las de los diques de abrigo. Se suelen diferenciar de ellos por sus dimensiones y forma estructural ya que, mayormente, no deben satisfacer condiciones tan restrictivas para la transmisión de energía y, suelen ubicarse en zonas donde el oleaje de cálculo está acotado por rotura u otras causas.

Es habitual que se diseñen admitiendo que el rebase es por coronación y que el núcleo sea filtro de los sedimentos (arena) de la playa para favorecer su retención. En estos casos, la altura relativa del dique (Fc/H) es pequeña, al nivel del mar o por debajo de él, y la anchura relativa, B/L , es la mínima necesaria para su construcción con medios terrestres. No obstante, la casuística de los espigones costeros es muy variada. En algunos casos, por ejemplo el dique de la playa de la Zurriola en San Sebastián, el proyecto de un espigón costero con finalidad de proteger la costa es asimilable a la de un dique de abrigo y, técnicamente, sería congruente la aplicación de los métodos y herramientas desarrollados en esta ROM (incluso MEIPOR) a su proyecto, construcción y gestión.

La ubicación y disposición en planta de un dique, su traza y tipología determinan el canal de acceso, la bocana, el área de fondeo y maniobra y, en su caso, la localización de los muelles y atraques. Su presencia, por otra parte, interfiere con la dinámica marina, especialmente el oleaje, condicionando los niveles de uso y explotación, la seguridad y la aptitud para el servicio del área portuaria.

Bajo la acción de los agentes del emplazamiento, suelen alterarse tanto la geometría del dique como las propiedades formales y resistentes de sus materiales. Además, en el transcurso de su construcción y durante su vida útil el dique puede sufrir averías que evolucionan en el tiempo. Algunas de ellas tendrán, o no, incidencia en las actividades portuarias, y podrán, o no, afectar a la seguridad de la estructura, repercutiendo en su comportamiento, seguridad y aptitud para el servicio y condicionando su operatividad.

Tanto el inicio de los procesos de deterioro y de inicio de avería como su evolución espaciotemporal tienen un marcado carácter aleatorio que depende, principalmente, de,

- (a) la tipología, partes y elementos de la misma, así como del nivel de avería en el que se encuentra y la separación entre éste y la destrucción (resiliencia),
- (b) la simultaneidad y compatibilidad de los valores de los agentes predominantes, así como su evolución temporal y duración,
- (c) la variabilidad de la respuesta estructural y formal del dique, y
- (d) las estrategias de conservación y reparación adoptadas.

1.3 TAREAS E HITOS A REALIZAR EN EL PROYECTO DE UN DIQUE DE ABRIGO

La aplicación del binomio ROM 1.1-18-MEIPOR requiere realizar una secuencia de tareas e hitos que han de estar necesariamente interconectadas a fin de que las etapas de planificación, proyecto y gestión guarden la debida coherencia. Entre otras, estas tareas son las siguientes,

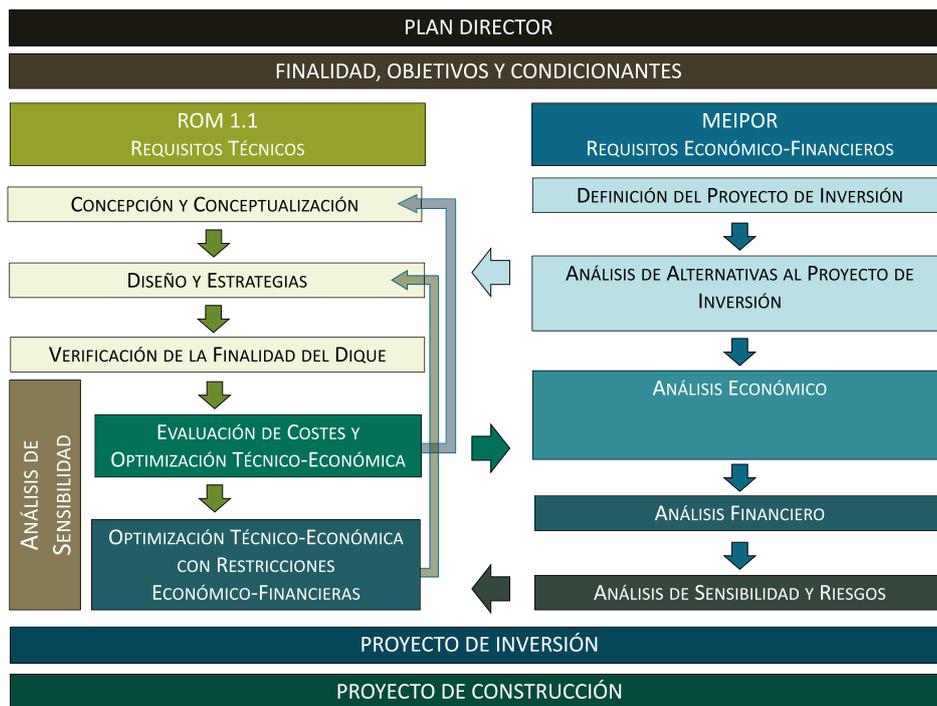
- (a) Concepción y conceptualización de la obra: razón y ser de la infraestructura, incluyendo la selección de la respuesta de la obra y sus líneas de fallo, cómo se desencadenan y se propagan.
- (b) Definición de medios y mecanismos y adopción de estrategias de construcción, conservación y reparación necesarias para posibilitar que el comportamiento del dique se ajuste a su concepción y finalidad en la vida útil y en otras fases de proyecto.
- (c) Evaluación del diseño mediante la verificación del cumplimiento de los requisitos y otros indicadores del proyecto, incluyendo en su caso, su adaptación a las consecuencias del calentamiento global.
- (d) Evaluación y optimización técnico-económica de cara al proceso de toma de decisiones de asignación de costes, considerando los de construcción, conservación y, en su caso, de reparación y desmantelamiento, así como los generados por la afección a las actividades del área portuaria debidos a los fallos estructurales y a las paradas operativas.
- (e) Evaluación y optimización económico-financiera de cara al proceso de toma de decisiones asociadas a la generación de valor; en particular, en relación con la asignación o reparto de ingresos, márgenes, beneficios o excedentes a todos los agentes asociados, incluyendo la sociedad en su conjunto, teniendo en cuenta las necesidades de recursos y las estrategias de ejecución y decisión adoptadas anteriormente.

En función de las decisiones adoptadas en el Plan Director de Infraestructuras, la concepción y el comportamiento estructural y formal y la aptitud para el servicio del dique de abrigo, así como la operatividad asociada a él están condicionados principalmente por,

- (a) la finalidad, ubicación espacial, (emplazamiento), y disposición del área portuaria;
- (b) los agentes y acciones en el emplazamiento;
- (c) su traza, batimetría y características del terreno; y
- (d) los condicionantes legales y ambientales.

Especificada la finalidad del dique y concordante con su razón y ser, el proyectista debe concebir la traza del dique, delimitar cada uno de sus tramos y seleccionar los modos de fallo principales que van a determinar su fiabilidad y operatividad. Cada tramo se diseña en función de los modos de fallo principales y de los indicadores probabilidad conjunta de fallo y de parada operativa en la vida útil.

Figura 1.7: Instrumentos de planificación de puertos y requisitos de evaluación ambiental



1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN Y GRADO DE DESARROLLO

En esta ROM se distinguen cuatro tipos de proyectos en función del carácter o la importancia de la obra, (especificada, según se ha citado, por los indicadores IRE e ISA, IREO e ISAO definidos en la ROM 0.0-01), y el coste total de la inversión, (ver figura 1.8).

Atendiendo al carácter de la obra, los proyectos se clasifican en aquellos con hipotéticas repercusiones derivadas de la ocurrencia de fallos, valorables como bajas o altas. Los primeros corresponden a proyectos con ISA e IRE menores que 20, y los segundos a cualquier otra situación.

Atendiendo a la importancia de la inversión, el sistema dual ROM-MEIPOR considera dos clases de proyecto I y II. Los Proyectos de Construcción se ordenan en aquellos que estén vinculados a un Proyecto de Inversión ($C_1 > C_0$) cuya rentabilidad debe ser evaluada y aquellos que no lo están, ($C_1 \leq C_0$). C_0 es el parámetro económico de adimensionalización, cuyo valor depende de la estructura económica y del grado de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra, variando, en consecuencia, con el transcurso del tiempo (ver apartado 2.11 de la ROM 0.0-01).

En España, $C_0 = 3$ M€ es un umbral del coste total de la inversión a partir del cual se debe considerar la ejecución, o no, del sistema dual ROM-MEIPOR. En consecuencia, cada Proyecto de Construcción tiene, debidamente justificada, su trayectoria de grados de desarrollo y criterios para la de toma de decisiones. En MEIPOR se detallan las condiciones requeridas para su aplicación.

Figura 1.8: Clasificación de proyectos según el carácter de la obra y la magnitud de la inversión



1.4.1 Grados de desarrollo del proyecto del dique

El proyecto del dique tiene dos etapas bien diferenciadas. En la primera se concibe, prioritariamente, el comportamiento del dique como infraestructura de abrigo y se verifica el incumplimiento de los objetivos de proyecto a través de los modos de fallo y de parada relacionados con la seguridad y la operatividad de la estructura. Es una aproximación eminentemente técnica e incluye el análisis de costes recogido en la ROM 1.0-09.

En la segunda etapa se analiza el dique como una infraestructura de abrigo insertada en el área portuaria, se cuantifica la incidencia de sus averías y su reparación en los objetivos y fines del área portuaria, entre ellos los que inciden en su rentabilidad financiera y económica. Para ello, se elaboran estrategias de construcción, explotación, reparación y desmantelamiento y árboles de decisión. Es un análisis que, por medio de la optimización de la obra, engarza lo

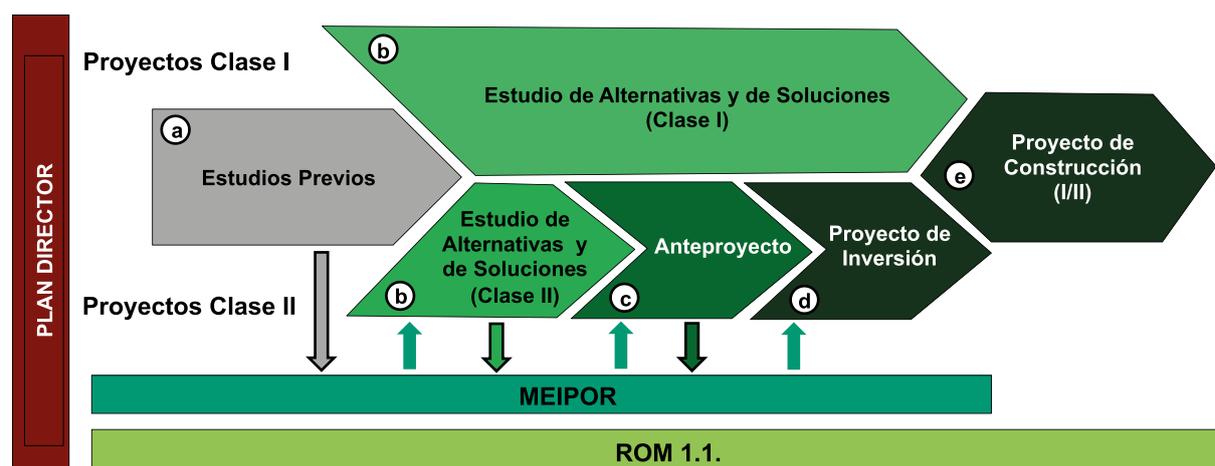
técnico con lo financiero y económico, la fiabilidad y operatividad del dique en cada una de las fases de proyecto con sus implicaciones socio-ambientales y el nivel de riesgo de la inversión.

La secuencia de actividades que conducen al Proyecto de Construcción, entre ellas las de concepción, verificación y optimización, se concretan en la ejecución material de Estudios y Proyectos cuyo grado de desarrollo crece en complejidad y precisión al tiempo que se acota su incertidumbre. En esta ROM se proponen los siguientes grados de desarrollo,

- (a) Estudios Previos,
- (b) Estudio de Alternativas y de Soluciones,
- (c) Anteproyecto,
- (d) Proyecto de Inversión,
- (e) Proyecto de Construcción.

En cada uno de ellos, se debe tomar decisiones sobre la disposición en planta del dique, la tipología, los procesos constructivos y los costes totales financieros y económicos. Solamente los proyectos de Clase II conllevan la ejecución material de los grados (c) y (d).

Figura 1.9: Grados de desarrollo del proyecto ROM 1.1-18



1.4.2 Objetivos y actividades según el grado de desarrollo del proyecto

En este Artículo se proponen de forma indicativa los objetivos específicos y las actividades (tareas e hitos) más relevantes a realizar en función del grado de desarrollo del proyecto. Al final de cada uno de los Artículos se incluye un cuadro resumen de las actividades principales a ejecutar en cada uno de los grados de desarrollo ordenadas por “bloques conceptuales” de trabajo y de toma de decisiones:

- (a) Concepción de la obra
- (b) Estrategias de proyecto y construcción y toma de decisiones
- (c) Verificación de los requisitos técnicos de proyecto y probabilidad de fallo
- (d) Cálculo de costes totales
- (e) Análisis de sensibilidad y optimización técnico-económica
- (f) Optimización económico-financiera y de análisis de riesgos

Además, se incluye la información sobre los criterios de selección de los resultados en cada grado de desarrollo del proyecto para su transferencia al grado de desarrollo superior.

Estudios Previos

Para iniciar los Estudios Previos, con carácter general, es necesario disponer de la siguiente información:

- (a) Plan Director de Infraestructuras,
- (b) función de la obra, carácter y requisitos de explotación, sociales y ambientales,
- (c) condicionantes del emplazamiento: morfológicos, materiales y procesos constructivos,
- (d) caracterización de los agentes climáticos y del terreno en el emplazamiento,
- (e) formas en planta a considerar y estudios disponibles.

Los objetivos específicos de este grado de desarrollo son,

- (a) analizar de forma preliminar, con el método de Nivel I, la viabilidad técnica y económica de diferentes formas en planta y tipologías;
- (b) determinar con criterios simples (IRE, ISA, IREO e ISAO) las repercusiones económicas, sociales y ambientales y especificar los requisitos de proyecto de cada una de aquellas;
- (c) analizar de forma preliminar los procesos de construcción y sus condicionantes;
- (d) considerar de forma preliminar los riesgos de la inversión;
- (e) seleccionar, mediante la aplicación de técnicas de diagnóstico DAFO o similares, y proponer las opciones más adecuadas para el Estudio de Alternativas y de Soluciones.

Las actividades (tareas e hitos) más relevantes son,

- (a) analizar y caracterizar las diferentes formas en planta y analizar la función del dique como infraestructura de abrigo del área portuaria;
- (b) seleccionar la tipología y determinar las dimensiones de la alineación principal del dique y acotar los tramos restantes y secciones especiales mediante relaciones, normas y criterios de ingeniería;
- (c) considerar los procesos y medios constructivos, estimar el plazo de ejecución y, aplicando costes unitarios, evaluar sus costes y los de desmantelamiento;
- (d) verificar con criterios deterministas la adaptación de la obra a las posibles consecuencias del calentamiento global;
- (e) calcular con criterios deterministas y homogéneos la rentabilidad económica y financiera de la inversión;
- (f) redactar una pre-memoria ambiental y, en su caso, pre-memoria social con los aspectos más críticos de cada una de las opciones analizadas; y
- (g) especificar, en su caso, las campañas de campo, estudios y elaboración de datos necesarios para el desarrollo de los trabajos en los siguientes grados de desarrollo del proyecto.

CONTENIDOS DE LOS ESTUDIOS PREVIOS

Los Estudios Previos se concretarán en un documento cuya Memoria contendrá una relación justificada y jerarquizada de las opciones recomendadas para iniciar el Estudio de Alternativas y de Soluciones.

CUADRO RESUMEN

Tabla 1.1: Cuadro resumen de los Estudios Previos

		Desarrollo	Herramientas
Concepción de la obra	Jerarquía de la obra	Preliminar	Diagramas de componentes
	Caracterización de modos y relaciones	Preliminar	-
	Evolución temporal de la avería	NO	-
	Evolución espacial de la avería	NO	-
	Reparto de probabilidades	Preliminar	Técnicas de reparto
Toma de decisiones	Estrategias de avance	Preliminar	Descriptivas
	Estrategias de reparación	NO	-
Verificación de requisitos	Evaluación de la fiabilidad	Preliminar	Estadísticas estándar, Diagramas de componentes, Nivel I
	Evaluación de la operatividad	Preliminar	Estadísticas estándar, Nivel I
Cálculo de costes	Costes de construcción	Preliminar	Tablas generales
	Costes de reparación	Preliminar	Coefficientes
	Pérdidas de operatividad y externalidades	Preliminar	Coefficientes
	Costes de desmantelamiento	Preliminar	Coefficientes
Criterios de selección		SÍ	DAFO o similar
Sensibilidad y optimización		Preliminar	Variables "críticas", Análisis discretos

Estudio de Alternativas y de Soluciones

Para iniciar estos Estudios, con carácter general, es necesario disponer de la siguiente información:

- Documento de Estudios Previos,
- datos de campañas de campo y estudios complementarios requeridos en los Estudios Previos,
- estimaciones de los márgenes de los requisitos económico-financieros del proyecto.

Los objetivos específicos de este grado de desarrollo son,

- identificar y diseñar las diferentes alternativas que pudieran ser soluciones potenciales según las formas en planta seleccionadas y de cada uno de sus tramos y en función de su razón y ser;
- comparar las viabilidades técnica y económica de cada alternativa, incluyendo su posible adaptación a las consecuencias del calentamiento global;
- reevaluar las repercusiones económicas, sociales y ambientales, especificar los requisitos de proyecto de cada una de las alternativas y los indicadores de riesgo;
- analizar comparativamente los procesos y medios constructivos, sus condicionantes y los costes totales del proyecto, incorporando, si el proyecto es de Clase II, una primera estimación de los requisitos económico-financieros;
- analizar comparativamente la interacción de la infraestructura marítima con el litoral y otros estudios ambientales;
- optimizar de forma técnico-económica las principales características y dimensiones de la obra, considerando, si el proyecto es de Clase II, una primera estimación de los requisitos económico-financieros;
- calcular y analizar comparativamente los riesgos de la inversión; y

- (h) seleccionar, mediante la aplicación de técnicas multicriterio o similares, la alternativa que resulta ser la solución más favorable para iniciar el Proyecto de Construcción si el proyecto es de Clase I, o del Anteproyecto si el proyecto es de Clase II.

Las actividades (tareas e hitos) más relevantes son,

- (a) estudiar de forma simplificada el comportamiento hidrodinámico, geotécnico, estructural y constructivo de cada disposición en planta y de sus tramos y analizar la función del dique como infraestructura de abrigo del área portuaria;
- (b) dimensionar las secciones de los diferentes tramos del dique para diferentes configuraciones de diagramas de modos de fallo y de parada y jerarquía de subsistemas teniendo en cuenta la evolución del daño en la vida útil;
- (c) analizar y comparar los diseños resultantes del punto anterior con los obtenidos por el método de Nivel I, si procede;
- (d) evaluar la incidencia del diseño en la vida útil de la infraestructura para diferentes estrategias de reparación, y en la seguridad y operatividad del área portuaria;
- (e) estudiar los procesos y medios constructivos, estimar el plazo de ejecución y evaluar sus costes más probables incluyendo los de reparación, conservación y desmantelamiento considerando, de forma preliminar, las estrategias de construcción;
- (f) cuantificar la interacción de la obra con la morfodinámica litoral, su influencia en la calidad del agua y abordar los condicionantes legales y administrativos de cada una de ellas;
- (g) verificar la adaptación de la obra a las posibles consecuencias del calentamiento global;
- (h) analizar la sensibilidad del cumplimiento de los requisitos de proyecto a las principales características y dimensiones de la obra y efectuar una optimización técnico-económica simplificada de las mismas incorporando, si el proyecto es de Clase II, una estimación de los requisitos económico-financieros;
- (i) calcular con criterios semi-probabilistas y homogéneos la rentabilidad económica y financiera de la inversión de cada alternativa y estimar su nivel de riesgo;
- (j) elaborar las bases para la Memoria Ambiental y, en su caso, la Memoria Social con los aspectos más críticos de cada una de las alternativas analizadas;
- (k) recabar e incorporar las opiniones ponderadas de los usuarios, gestores y la Administración del área portuaria sobre las diferentes alternativas;
- (l) proponer y especificar, en su caso, las campañas de campo, estudios y elaboración de datos necesarios para el desarrollo de los trabajos en los siguientes grados de desarrollo del proyecto; y
- (m) transferir a MEIPOR, si procede, los costes descompuestos y totales de cada alternativa y su evolución temporal.

CONTENIDOS DEL ESTUDIO DE ALTERNATIVAS Y DE SOLUCIONES

El Estudio de Alternativas y de Soluciones se concretará en un documento cuya Memoria contendrá una relación justificada y jerarquizada de las alternativas y soluciones seleccionadas para iniciar el Proyecto de Construcción (si el proyecto es de Clase I) o el Anteproyecto si el proyecto es de Clase II. Además, se incorporará la Memoria Ambiental y, en su caso, la Memoria Social.

CUADRO RESUMEN

Tabla 1.2: Cuadro resumen del Estudio de Alternativas y de Soluciones

		Desarrollo	Herramientas
Concepción de la obra	Jerarquía de la obra	Simplificado	Diagramas de componentes
	Caracterización de modos y relaciones	Simplificado	Cotas inferior y superior
	Evolución temporal de la avería	Simplificado	Modelos tipo o estándar
	Evolución espacial de la avería	NO	-
	Reparto de probabilidades	SÍ	Técnicas de reparto
Toma de decisiones	Estrategias de avance	Simplificado	Cronograma
	Estrategias de reparación	Simplificado	Cotas inferior y superior
Verificación de requisitos	Evaluación de la fiabilidad	Simplificado	Estadísticas estándar, Diagramas de componentes, Ciclos sintéticos
	Evaluación de la operatividad	Simplificado	Estadísticas estándar, Ensayos modelo numérico, Datos de campañas de campo
Cálculo de costes	Costes de construcción	Simplificado	Cronograma, Tablas de costes
	Costes de reparación	Simplificado	Estadísticas estándar
	Pérdidas de operatividad y externalidades	Simplificado	Escenarios
	Costes de desmantelamiento	Simplificado	Cronograma, Tablas de costes
Criterios de selección		SÍ	Multicriterio o similar, Teoría de la decisión
Sensibilidad y optimización		Simplificado	Variables "críticas", Análisis discretos, Escenarios, Algoritmos de clasificación

Anteproyecto

Para iniciar el Anteproyecto, con carácter general, es necesario disponer de la siguiente información:

- Estudio de Alternativas y de Soluciones,
- datos de campañas de campo y estudios complementarios requeridos,
- bases, conclusiones o recomendaciones del Estudio de Impacto Ambiental y, en su caso, del Estudio de Impacto Social,
- información preliminar del análisis económico-financiero MEIPOR.

Los objetivos específicos de este grado de desarrollo son,

- diseñar la infraestructura y verificar los requisitos de proyecto en todas sus fases;
- determinar la viabilidad técnica y económica de la alternativa elegida como solución en función de la configuración de los modos, estrategias de gestión de la infraestructura y su incidencia en el área portuaria;
- analizar y, en su caso, diseñar la alternativa elegida como solución para su adaptación a las posibles consecuencias del calentamiento global;
- analizar los procesos y medios constructivos, sus condicionantes y costes;
- determinar la interacción de la infraestructura marítima con el litoral e incorporar, en su caso, las conclusiones y recomendaciones del Estudio de Impacto Ambiental;

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- (f) optimizar de forma técnico-económica las características y dimensiones de la obra, considerando los requisitos económico-financieros definidos por MEIPOR; y
- (g) calcular de forma aproximada el nivel de riesgo de la inversión de la infraestructura y su incidencia en el área portuaria.

Las actividades (tareas e hitos) más relevantes son,

- (a) determinar el comportamiento hidrodinámico, geotécnico, estructural y constructivo de sus tramos considerando la variabilidad espacio-temporal de los agentes en el emplazamiento;
- (b) incorporar las indicaciones y restricciones derivadas del Estudio Ambiental y de las imposiciones legales;
- (c) diseñar y verificar la seguridad y la operatividad de la infraestructura en cada uno de los tramos del dique, subsistemas y elementos a partir de los diagramas de modos de fallo en la infraestructura y su potencial incidencia en el área portuaria;
- (d) verificar la seguridad y la operatividad del área portuaria en función de las estrategias de reparación y diferentes árboles de decisión en todas las fases del proyecto y para cada una de las configuraciones de diagramas de modos;
- (e) verificar la adaptación de la obra a las posibles consecuencias del calentamiento global;
- (f) calcular los costes de construcción, conservación, reparación y desmantelamiento en función de los criterios de diseño, estrategias de construcción y de toma de decisiones;
- (g) optimizar de forma técnico-económica las dimensiones y propiedades de la obra; y
- (h) trasladar a MEIPOR la información necesaria para ejecutar los análisis financiero y económico y para estimar el nivel de riesgo de la alternativa elegida como solución, considerando las consecuencias de la avería del dique sobre la operatividad del área portuaria para distintos escenarios económicos.

CONTENIDOS DEL ANTEPROYECTO

El Anteproyecto estará formado por una Memoria en la que se expondrá la razón y ser de la infraestructura y su conceptualización estructural y formal, las conclusiones de los estudios de rentabilidad económica y financiera y el nivel de riesgo de la inversión. Además, contendrá los Anejos con la información, bases, condicionantes, requisitos e indicadores necesarios para la elaboración del Proyecto de Inversión y del Proyecto de Construcción.

CUADRO RESUMEN

Tabla 1.3: Cuadro resumen del Anteproyecto

		Desarrollo	Herramientas
Concepción de la obra	Jerarquía de la obra	Completo en detalle	Diagramas de componentes
	Caracterización de modos y relaciones	Completo en detalle	Modelos de dependencia
	Evolución temporal de la avería	Completo en detalle	Modelos específicos
	Evolución espacial de la avería	Completo en detalle	Árboles de desencadenamiento y propagación
	Reparto de probabilidades	NO	-
Toma de decisiones	Estrategias de avance	Completo en detalle	-
	Estrategias de reparación	Completo en detalle	Cotas, Árboles de decisión
Verificación de requisitos	Evaluación de la fiabilidad	Completo en detalle	Diagramas de componentes, Árboles de desencadenamiento y propagación, Árboles de decisión, Ensayos en modelo físico
	Evaluación de la operatividad	Completo en detalle	Ensayos en modelo físico
Cálculo de costes	Costes de construcción	Completo en detalle	Estrategia de avance
	Costes de reparación	Completo en detalle	Estrategia de reparación
	Pérdidas de operatividad y externalidades	Completo en detalle	-
	Costes de desmantelamiento	Completo	Estrategias de desmantelamiento
Criterios de selección		NO	-
Sensibilidad y optimización		SÍ	Técnicas específicas

Proyecto de Inversión

Para la elaboración del Proyecto de Inversión de la Infraestructura es necesario disponer, con carácter general, de la siguiente información sin perjuicio de atender de forma específica a lo indicado en **MEIPOR-16**:

- Anteproyecto
- conclusiones y recomendaciones del Estudio de Impacto Ambiental y, en su caso, del Estudio de Impacto Social
- otros estudios e informes económicos y financieros complementarios

Los objetivos específicos del Proyecto de Inversión (**MEIPOR-16, 2016**) son,

- gestionar la inversión con criterios basados en la generación de valor;
- dotar al Proyecto de Construcción del análisis de la inversión económica, productiva y de consecución de fines de interés general, incluyendo los aspectos medioambientales y de seguridad;
- introducir los efectos del Proyecto de Inversión en los agentes implicados en su desarrollo;
- evaluar el nivel de riesgo del Proyecto de Inversión incorporando el ciclo vital del dique de abrigo con diferentes escenarios de realización del proyecto; y
- fijar los requisitos económico-financieros al Proyecto de Construcción del dique.

Las actividades (tareas e hitos) más relevantes del Proyecto de Inversión son,

- concretar el contexto y definir los objetivos del Proyecto de Inversión;
- identificar, caracterizar, priorizar y seleccionar las soluciones;

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- (c) determinar los efectos económicos y financieros del proyecto en los agentes implicados en su desarrollo;
- (d) determinar los costes de la inversión de forma desagregada;
- (e) determinar la distribución estadística de los indicadores de la rentabilidad económica y financiera del proyecto incluyendo los procesos y las estrategias de construcción y de reparación del dique y la toma de decisiones; y
- (f) optimizar y analizar la sensibilidad del proyecto a las diferentes categorías de riesgos y estimar la distribución estadística del nivel de riesgo del Proyecto de Inversión.

CONTENIDOS DEL PROYECTO DE INVERSIÓN

El Proyecto de Inversión incluirá una Memoria con los resultados del análisis de rentabilidad financiera y económica esperada, el análisis de sensibilidad, de escenarios y de riesgos, la evaluación del nivel de riesgo del proyecto y, en su caso, todo lo necesario para la redacción del Proyecto de Construcción y el control económico-financiero de la construcción, gestión y explotación del dique de abrigo en el ámbito del área portuaria y los Anejos necesarios para su comprensión y comprobación.

Proyecto de Construcción

Para la elaboración del Proyecto de Construcción del dique de abrigo, con carácter general, es necesario disponer de la siguiente información:

- (a) Estudio de Alternativas y de Soluciones en proyectos Clase I y Anteproyecto y Proyecto de Inversión del área portuaria y de la infraestructura en proyectos Clase II,
- (b) conclusiones y recomendaciones del Estudio de Impacto Ambiental y, en su caso, del Estudio de Impacto Social.

El objetivo específico del Proyecto de Construcción es dar forma técnica, administrativa y contractual a la alternativa escogida como solución en proyectos Clase I y al Anteproyecto y Proyecto de Inversión en proyectos Clase II, para la ejecución del dique de abrigo, su puesta en funcionamiento, gestión y explotación, conservación, reparación y su desmantelamiento, obtenidos mediante optimización técnico-económica y, en su caso, económico-financiera.

Las actividades (tareas e hitos) más relevantes del Proyecto de Construcción son,

- (a) desarrollar y completar técnicamente y económicamente el proyecto;
- (b) efectuar una optimización técnico-económica de las dimensiones y propiedades de la obra incorporando, en el caso de proyectos Clase II, las restricciones financieras de MEIPOR incluidas en el Proyecto de Inversión;
- (c) implementar y verificar las estrategias de avance de la construcción;
- (d) implementar y verificar las estrategias de reparación y los medios disponibles;
- (e) desarrollar un plan de observación de la obra y seguimiento de la avería;
- (f) obtener las funciones de probabilidad de los costes totales del proyecto en función de las estrategias de construcción, explotación, conservación, reparación y desmantelamiento;
- (g) efectuar la optimización técnico-económica completa de la obra imponiendo, en su caso, los requisitos económico-financieros de MEIPOR;
- (h) verificar los requisitos del proyecto de la infraestructura, la adaptación a las posibles consecuencias del calentamiento global y, en su caso, el nivel aceptable de riesgo del Proyecto de Inversión; y
- (i) elaborar los documentos, planos, especificaciones técnicas, etc., necesarios para una correcta ejecución y control de las obras.

CONTENIDOS DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

El Proyecto de Construcción incluirá, al menos, los documentos necesarios para el desarrollo contractual y ejecución y control de las obras, entre ellos la Memoria, los Planos de conjunto y de Detalle, el Pliego de prescripciones técnicas particulares, las Mediciones, el Presupuesto, el Plan de obra, el Estudio de seguridad y salud, y el Estudio de gestión de residuos de construcción y demolición. Asimismo, los Anejos a la Memoria que, como mínimo, deberán

incluir los datos y bases de partida, la justificación técnica de la solución adoptada, el plan de gestión, explotación, conservación y desmantelamiento y la justificación de precios.

En el subdocumento “Anejos de especificaciones técnicas generales para el proyecto” (ver Artículo 1.5.1), se detalla un índice general de los contenidos de un Proyecto de Construcción de un dique de abrigo.

Concreción de tareas e hitos de los grados de desarrollo en esta ROM

En las Secciones 4 y 5 se detallan de forma específica las tareas e hitos más relevantes que se describen en este Artículo 1.4 y se incluyen en los Cuadros resumen de los diferentes grados de proyecto (Tabla 1.1 a Tabla 1.3), relacionados con,

- ◆ Métodos de verificación (Artículo 4.4)
- ◆ Cálculo de costes totales y optimización técnico-económica (Artículo 5.4)

Estas tareas e hitos complementan y detallan aquellas, especificando los contenidos y la organización de esta ROM 1.1-18 y de los documentos elaborados a partir de ella. Conjuntamente con las variantes en la concepción y diseño (Artículo 2.8) conforman un espacio metodológico amplio y flexible para optimizar los objetivos del Proyecto de Construcción.

1.5 CONTENIDOS Y ORGANIZACIÓN DE LA ROM 1.1-18 POR SECCIONES

En estas Recomendaciones se desarrollan las bases para el proyecto de las tipologías más habituales de obras de abrigo, diques verticales, mixtos o diques berma, y diques en talud, con y sin espaldón. No obstante, el planteamiento y desarrollo propuesto amplía la oferta tradicional de tipologías estándar y, apoyándose en el análisis de comportamiento de cada una de las partes de la sección tipo, abre la posibilidad de diseñar tipologías con partes y elementos específicos adecuados a las necesidades de cada proyecto de inversión.

En concreto en esta ROM 1.1-18 se proporcionan:

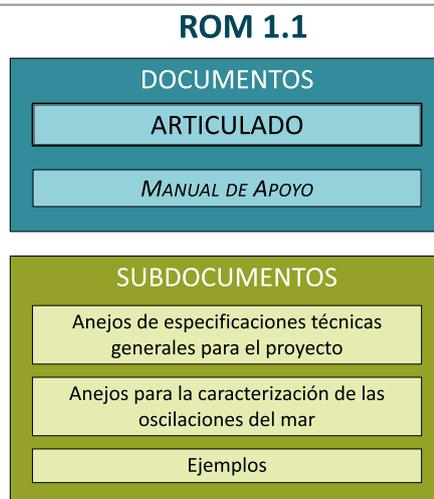
- (a) los métodos para especificar los requisitos de proyecto y verificar que la obra en su conjunto y en cada uno de sus tramos los cumplen en todas las fases del proyecto;
- (b) las herramientas técnicas para diseñar y para planificar los medios y los procesos de su construcción, conservación, reparación y desmantelamiento de un dique de abrigo, cualquiera que sea su tipología;
- (c) los criterios y los métodos para evaluar los costes totales de la infraestructura incluidos los de construcción, conservación y reparación y, en su caso, desmantelamiento;
- (d) los criterios y los métodos para la optimización técnico-económica de la obra observando los requerimientos financieros y económicos del Proyecto de Inversión; y
- (e) los grados de desarrollo para ejecutar el Proyecto de Construcción de un dique de abrigo al amparo, en su caso, del Proyecto de Inversión.

Estos procedimientos, criterios y métodos dependen, entre otros, del grado de desarrollo del proyecto, de las estrategias de conservación y reparación y de la evaluación de las consecuencias de las averías en la gestión y explotación del área portuaria y se detallan en las siguientes Secciones de este Articulado.

1.5.1 Organización del documento ROM 1.1-18

El documento ROM 1.1-18 se estructura en dos documentos y tres subdocumentos (ver figura 1.10). Aunque están redactados para su aplicación a cualquier Proyecto de Construcción de un dique de abrigo, la mayoría de los métodos y herramientas desarrollados para esta ROM se pueden utilizar también en Proyectos de Inversión de otras infraestructuras marítimas del área portuaria tales como muelles y atraques, canales de navegación, etc.

Figura 1.10: Cuadro de contenidos de la ROM 1.1-18



Articulado

En el *Articulado* se especifican los procedimientos y métodos requeridos para alcanzar y verificar los objetivos del proyecto de un dique de abrigo de acuerdo con la ROM 0.0-01, ROM 1.0-09 y otras Recomendaciones. Se estructura en cinco Secciones, tal y como se describe a continuación.

- ◆ **S1. Introducción, marco general y organización de la ROM 1.1-18.** Contiene el contexto general de la ROM 1.1-18 y su conexión con las herramientas de análisis económico y financiero de infraestructuras portuarias. Describe el marco legal en que se apoya, los objetivos que se propone y su alcance, organizados por grados de desarrollo del Proyecto de Construcción. Se completa con una descripción de la organización, estructura y contenidos del conjunto de documentos que conforman la ROM 1.1-18, y con una relación de las recomendaciones y normas en que se apoya.
- ◆ **S2. Bases específicas para el proyecto.** Describe las bases y criterios generales para la concepción de un dique de abrigo, extendiendo aquellas presentadas en otros documentos del Programa de “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)”, en particular ROM 0.0-01. Plantea las metodologías, procedimientos y herramientas para considerar la variabilidad espacio-temporal de los agentes y la respuesta del dique, la caracterización y descripción de su estado y la evolución espacial y temporal de la avería, atendiendo a las posibles estrategias de conservación y reparación.
- ◆ **S3. Procedimiento para el diseño y dimensionamiento.** Profundiza en la aplicación de los criterios contenidos en la Sección 2 al diseño de diques de abrigo. Contiene una descripción de las principales tipologías de dique y los elementos que las caracterizan así como los criterios y estrategias para su estructuración y diseño. Se incluye también una descripción de los modos de fallo y de parada más relevantes en los distintos tramos que componen la traza del dique.
- ◆ **S4. Verificación del dique de abrigo en una fase de proyecto.** Describe los requisitos técnicos de la obra, su marco de aplicación así como los métodos, herramientas e indicadores para verificar su cumplimiento, considerando la evolución espacio-temporal de la avería y las estrategias de conservación y reparación. Incluye también una descripción de los procedimientos de verificación recomendados en función del carácter de la obra y del grado de desarrollo del proyecto.
- ◆ **S5. Evaluación de costes, optimización y nivel de riesgo.** Establece los requisitos de la obra en relación con las necesidades económicas y financieras del área portuaria. Proporciona los métodos, herramientas e indicadores para cuantificar los costes asociados a las distintas fases del ciclo vital de la obra, para efectuar la optimización técnico-económica con y sin restricciones, y para evaluar el nivel de riesgo de la inversión.

El contenido se completa con los siguientes anejos al articulado:

- ◆ A-I. Símbolos y definiciones
- ◆ A-II. Comentarios y ejemplos
- ◆ A-III. Indicadores económico-financieros MEIPOR
- ◆ A-IV. Referencias
- ◆ A-V. Redacción de la ROM I.1-18

COMENTARIO

La bibliografía consultada para la elaboración de estas recomendaciones es muy extensa. Las referencias que se ofrecen no constituyen sino una breve muestra, y no son necesariamente representativas de todas las publicaciones dedicadas a la investigación y la experiencia en este terreno.

Manual para el diseño de diques de abrigo y de ayuda a la aplicación del Articulado de la ROM I.1-18

La finalidad del *Manual* es facilitar la puesta en práctica de las recomendaciones incluidas en el *Articulado*. Constituye un documento en el que se desarrollan planteamientos, métodos y herramientas compatibles con las indicaciones del *Articulado*, y debe actualizarse periódicamente para adaptarse al nivel actual del conocimiento y sus limitaciones. Se estructura en tres capítulos con el siguiente contenido:

- ◆ **C1. Descripción del emplazamiento.** Indica la finalidad del área portuaria y del dique de abrigo, y establece las bases geométricas para la descripción del emplazamiento y del conjunto de la obra, proporcionando información sobre los elementos necesarios para concebir una obra marítima (topografía y batimetría; terreno, lecho y sismo; agentes climáticos atmosféricos y marítimos; morfodinámica litoral y calidad del agua; y canteras y escolleras).
- ◆ **C2. Tipologías de dique, modos de fallo y de parada.** Se da la información necesaria para proyectar, en función de los agentes predominantes en el tramo, una tipología del dique de abrigo. Se describen los regímenes y dominios de comportamiento hidrodinámico del dique y sus tramos. Se proporcionan una serie de recomendaciones para el diseño y predimensionamiento de la traza, tramos y secciones. Asimismo se describen fórmulas para el cálculo para determinar la geometría de la sección y su comportamiento hidrodinámico frente a los agentes climáticos. Por último, se proponen metodologías de trabajo para la verificación frente a los modos de fallo y parada de los requisitos técnicos de un dique de abrigo y sus tramos.
- ◆ **C3. Evaluación de costes de construcción y reparación de un dique de abrigo.** Se proporciona un conjunto de métodos y herramientas para la organización del proceso constructivo y la definición de estrategias de construcción y reparación y para la caracterización estadística de los costes de las distintas fases de proyecto y su distribución temporal.

Anejos de especificaciones técnicas generales para el proyecto

El contenido del *Articulado* se irá completando por medio de anejos que incorporarán información específica acerca de aspectos relevantes para el diseño, proyecto y explotación de un dique de abrigo, entre los que cabe destacar los siguientes:

- ◆ *Índice general de contenidos de un Proyecto de Construcción de un dique de abrigo*
- ◆ *Especificaciones sobre materiales de cantera para la construcción de diques de abrigo*
- ◆ *Especificaciones técnicas para el dragado del lecho marino*
- ◆ *Soluciones de detalles constructivos para diques de abrigo*
- ◆ *Catálogo de unidades de obra y costes*
- ◆ *Caracterización de las condiciones excepcionales de sismo y maremoto*
- ◆ *Especificaciones para la verificación experimental en canal y tanque de oleaje*

- ◆ Especificaciones para la verificación numérica y aplicación de códigos numéricos
- ◆ Especificaciones para la realización de campañas de campo

Anejos para la caracterización de las oscilaciones del mar

Estos anejos se componen de información relevante para la caracterización de los agentes en el emplazamiento, necesaria como punto de partida para el diseño, verificación y optimización de un dique de abrigo. Se considerarán los siguientes:

- ◆ **Fuentes de datos climáticos.** Contiene información acerca de bases de datos climáticos que sirvan de soporte de información para la aplicación de las Recomendaciones de Obras Marítimas. Este documento debe actualizarse periódicamente con nuevas fuentes de información o revisiones de las existentes. En su versión inicial incluye una descripción de las distintas fuentes de datos para los agentes climáticos marítimos y atmosféricos que proporciona Puertos del Estado.
- ◆ **Caracterización de los agentes en el emplazamiento.** Describe los métodos y herramientas analíticas y numéricas para caracterizar, a partir de modelos de probabilidad, los agentes climáticos atmosféricos y marítimos en el emplazamiento. Asimismo se proporcionan técnicas de pretratamiento de la información, de transformación de agentes, análisis conjunto para el estudio de la operatividad y fiabilidad, y métodos para la simulación numérica de los descriptores de estado de las variables principales. El anejo se complementa con un conjunto de subrutinas, funciones y procedimientos, que pueden ser empleados para la puesta en práctica de las metodologías y planteamientos descritos en él.

Ejemplos

Este subdocumento se compone de un conjunto de ejemplos parciales del proceso de caracterización de los agentes y del diseño y verificación de obras de abrigo, estructurados en función del grado de desarrollo del proyecto.

1.6 RELACIÓN CON OTRAS RECOMENDACIONES DEL PROGRAMA ROM, INSTRUCCIONES Y NORMAS

Esta ROM 1.1-18 se encuadra dentro de la *Serie 1* del Programa de “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)”, dedicada al proyecto y construcción de las obras de abrigo, y está redactada teniendo en cuenta otras Recomendaciones del programa ROM que ya han incorporado las técnicas probabilistas (y métodos basados en el comportamiento integral del sistema), especialmente aquellas que se dedican al proyecto de la configuración de las áreas portuarias, canales de acceso y zonas de maniobra, obras de atraque y amarre y calidad de agua en áreas litorales.

Además se han tenido en cuenta los siguientes documentos y software:

- (a) Eurocódigos e Instrucciones oficiales de ámbitos técnicos afines
- (b) ISO 2394: General principles on reliability for structures
- (c) ISO 23469: Bases for design of structures-seismic actions for designing geotechnical works
- (d) ISO 21650: Actions from waves and currents on coastal structures
- (e) Criteria for the selection of breakwater types and their related optimum safety levels, **PIANC report 196-2016**
- (f) Recommendations for increased durability and service life of new marine concrete infrastructure, **PIANC report 162-2016**
- (g) Seismic guidelines for ports. ASCE technical Council on lifetime Earthquake Engineering, Monograph 12, 1998
- (h) Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan, 2009
- (i) The Rock Manual. CIRIA C683, 2007
- (j) Sistema de Modelado Costero (SMC), “IHCantabria”, Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y el Mar del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, <http://smc.ihcantabria.es/>

Para una correcta aplicación de esta ROM se deberá tener en cuenta, complementariamente, el resto de Códigos e Instrucciones oficiales en el ámbito de la ingeniería civil tanto españolas como de la Unión Europea en cuyo ámbito de aplicación pueda considerarse que están incluidas las obras de abrigo y lo dispuesto por algunas de las Recomendaciones que forman parte del Programa ROM, entre ellas,

- ◆ **ROM 0.0-01.** Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias.
- ◆ **ROM 0.5-05.** Recomendaciones geotécnicas para las obras marítimas y portuarias.
- ◆ **ROM 1.0-09.** Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de abrigo: Bases y Agentes climáticos.
- ◆ **ROM 2.0-11.** Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre.
- ◆ **ROM 3.1-99.** Proyecto sobre la configuración marítima de los puertos: canales de acceso y áreas de flotación.
- ◆ **ROM 5.1-13.** Calidad de las aguas litorales en áreas portuarias.

Respecto a la calidad de las aguas se seguirá, entre otros textos legales, lo dispuesto en la Directiva Marco del Agua y en el texto refundido de la Ley de Aguas. Los aspectos relacionados con la morfodinámica litoral deberán adecuarse a lo prescrito en la Ley de Costas y en los documentos sobre Gestión Integral de Zonas Costeras de la Unión Europea. A tal efecto, se recomienda aplicar los métodos y las herramientas desarrollados en la **ROM 5.1-13** y en el Manual de Costas, en particular el Volumen IV, Medio Ambiente Litoral.

COMENTARIO

Las tareas y los hitos asociados a cada uno de los grados de desarrollo del proyecto deben ejecutarse por técnicos con la debida cualificación. A título informativo, en la Tabla siguiente se recoge una estimación del número de personas y su dedicación necesarios para elaborar las actividades asociadas a cada uno de los grados de desarrollo del proyecto en España. Por la amplitud de su casuística, en la tabla no se incluyen las campañas de campo, los ensayos de laboratorio y las labores de administración y gestión del proyecto. En otros países los valores consignados en la tabla pueden diferir significativamente y deben de revisarse y adecuarse a la especificidad de cada situación.

TABLA DE VALORES ORIENTATIVOS DE DEDICACIÓN (ESPAÑA)

Tabla 1.4: Valores orientativos de técnicos, cualificación y número estimado de horas de dedicación al proyecto (España)

		Porcentaje	Horas
Estudios Previos	Senior (1)	40	200
	Superior (1)	40	200
	Otros (1)	20	100
	Total (3)		500
Estudio de Alternativas y Soluciones	Senior (1)	30	450
	Superior (2)	40	600
	Otros (2)	30	450
	Total (5)		1500
Anteproyecto	Senior (1)	20	600
	Superior (3)	60	1800
	Otros (4)	20	600
	Total (8)		3000
Proyecto de Inversión	Total (4)		3000
Proyecto de Construcción	Senior (1)	20	1000
	Superior (3)	60	3000
	Otros (4)	20	1000
	Total (8)		5000

Índice Sección II

SECCIÓN II: BASES ESPECÍFICAS PARA EL PROYECTO

2.1	PLANTEAMIENTO GENERAL PARA LA CONCEPCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	45
2.2	ORGANIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL PROYECTO.....	46
2.2.1	Organización temporal: fases de proyecto.....	46
2.2.2	Organización espacial: tramos.....	49
2.3	COMPORTAMIENTO DEL TRAMO POR ESTADOS DE OBRA.....	51
2.3.1	Espacio muestral y de sucesos.....	51
2.3.2	Modos de fallo y de parada.....	51
2.3.3	Conjunto completo de modos.....	53
2.3.4	Espacio de sucesos y diagramas de componentes.....	53
2.4	CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA AVERÍA.....	55
2.4.1	Modelo conceptual del progreso temporal del nivel de daño acumulado.....	57
2.4.2	Curvas de estado del daño medio acumulado.....	59
2.4.3	Trayectoria del daño acumulado en un ciclo de solicitud.....	63
2.4.4	Dependencia temporal del modelo de probabilidad del daño acumulado.....	65
2.4.5	Progreso temporal de otras variables acumulativas.....	68
2.4.6	Niveles de parada operativa y evolución temporal de la parada operativa.....	70
2.5	PROBABILIDAD DE FALLO A UN NIVEL DE AVERÍA AVANZADO.....	71
2.5.1	Concepciones para el diseño.....	71
2.5.2	Indicadores de la evolución temporal de la fiabilidad.....	74
2.6	ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LA AVERÍA.....	76
2.6.1	Árboles de desencadenamiento y propagación.....	76
2.6.2	Árbol para la toma de decisiones.....	78
2.7	IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE PROYECTO Y COMPONENTES CRÍTICOS.....	78
2.8	VARIANTES EN LA CONCEPCIÓN Y DISEÑO DE UN DIQUE DE ABRIGO.....	80
2.8.1	Variante 1:Tramos con modos de fallo y de parada independientes y nivel máximo de daño.....	80
2.8.2	Variante 2:Tramos con modos de fallo y de parada independientes y evolución temporal de la avería.....	81
2.8.3	Variante 3:Tramos con modos de fallo y de parada concomitantes/dependientes y concatenación de otros modos de fallo.....	81

2. Bases específicas para el proyecto

En la **ROM 0.0-01** se plasman los objetivos del proyecto de una infraestructura marítima en unos requisitos de proyecto que deben satisfacerse a lo largo de las distintas fases por las que pasa la obra desde su construcción hasta su desmantelamiento. Se verifican atendiendo a su variabilidad: (1) espacial de la traza del dique, (2) temporal de las condiciones por las que pasa la obra, (3) espacio-temporal de las acciones de los agentes naturales y de la respuesta del sistema, y a su finalidad como infraestructura del área portuaria.

En esta ROM 1.1-18 se detallan y se amplían estos conceptos, métodos y herramientas, y se adecuan a las necesidades específicas del dique de abrigo y de MEIPOR. En particular, se formulan y desarrollan las bases específicas para el diseño, verificación y optimización de un dique considerando diversos niveles de avería y estrategias de reparación.

2.1 PLANTEAMIENTO GENERAL PARA LA CONCEPCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO

La concepción formal y estructural de una infraestructura marítima se puede ordenar en cuatro bloques con los siguientes objetivos específicos

1. organización espacio-temporal del proyecto
2. caracterización del estado de la obra y sus componentes
3. evolución espacio-temporal de los modos de fallo
4. evaluación de los costes totales y optimización

La organización espacio-temporal del proyecto constituye la estructura orgánica de trabajo en la que se diseña, se verifica el cumplimiento de los requisitos de proyecto, y se concretan las fases temporales y los tramos, subsistemas y elementos que configuran el dique.

El estado de la obra y de sus componentes define la unidad temporal de proyecto. Su caracterización permite determinar los elementos que son susceptibles de fallo o parada, junto con los mecanismos que conducen a ello y establecer las relaciones jerárquicas entre las diferentes organizaciones espacio-temporales del proyecto.

Esta caracterización se apoya en,

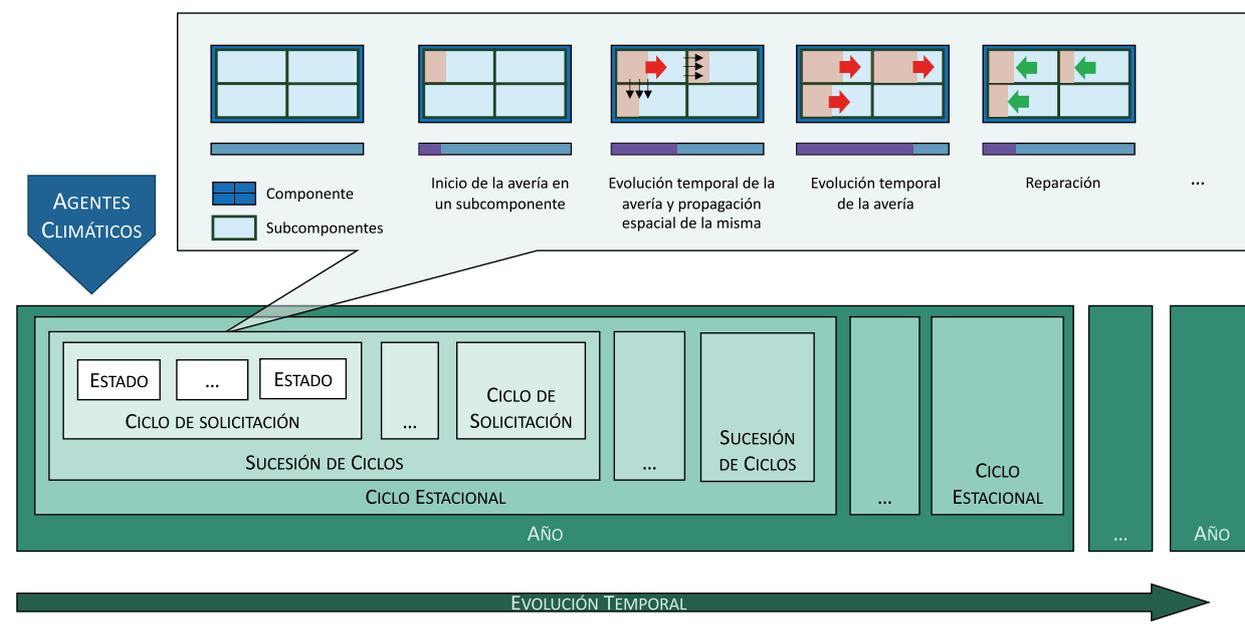
- el espacio muestral y espacio de sucesos que describen el fallo o parada de los distintos componentes del sistema,
- los modos y el conjunto de modos que son susceptibles de afectar al comportamiento del dique y su diseño,
- las relaciones entre el estado de componentes de distinto orden jerárquico mediante diagramas de componentes.

La evolución espacio-temporal del modo de fallo y parada, su manifestación, persistencia y propagación, permite definir y acotar los mecanismos de control que favorecen el cumplimiento de los requisitos de proyecto. Esta evolución se cuantifica mediante la elaboración de,

- árboles de desencadenamiento y propagación,
- modelos de evolución del daño o de la parada,
- estrategias para el control de la propagación de la avería.

La evaluación de los costes totales y la optimización técnico-económica de la infraestructura permite pronosticar los costes anuales asociados a su comportamiento frente a la seguridad y la operatividad en cada una de las fases de proyecto, y conectar estos resultados con la optimización financiera y económica del proyecto de inversión. Es decir, la información necesaria para tomar decisiones basados en el nivel riesgo y el análisis de sensibilidad (MEIPOR).

Figura 2.1: Esquema de trabajo para diseñar, verificar y optimizar un dique de abrigo considerando la evolución espacio-temporal de los modos de fallo y de parada



2.2 ORGANIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DEL PROYECTO

2.2.1 Organización temporal: fases de proyecto

El ciclo vital de un dique de abrigo es el intervalo de tiempo que transcurre entre el inicio de su construcción hasta su transformación, cambio de uso o desmantelamiento. Este intervalo se ordena por fases en función de su finalidad principal, aunque puedan tener otras secundarias. En cada una de ellas los agentes climáticos (y otros agentes) interaccionan con el dique y sus tramos, afectando, o no, al cumplimiento de los objetivos de proyecto.

Fases de proyecto en un dique de abrigo

Considerando los objetivos, la finalidad y la actividad principal en el intervalo de tiempo, se puede identificar, entre otras, las siguientes fases de proyecto (para más detalle, ver apartado 2.4.2 de la ROM I.0-09),

CONSTRUCCIÓN

Se extiende desde el inicio de la construcción hasta la puesta en servicio de la obra, entendiendo por tal, el instante en el cual la obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida.

SERVICIO

Se inicia en el instante en el que el tramo de obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida y finaliza con su remodelación, transformación o desmantelamiento. Puede interrumpirse parcial o totalmente durante la fase de conservación y reparación.

CONSERVACIÓN Y REPARACIÓN

Incluye los intervalos de tiempo en los que de forma periódica o circunstancialmente se realizan trabajos de conservación y de reparación y que pueden conllevar una reducción temporal de la seguridad, de la aptitud para el servicio o del uso y explotación de la obra en alguno de sus tramos o del área portuaria.

REMODELACIÓN, TRANSFORMACIÓN Y DESMANTELAMIENTO

Incluyen los intervalos de tiempo en los que de forma continua o discontinua se realizan actividades de remodelación/reconstrucción, transformación o desmantelamiento de la infraestructura o del área portuaria, o la restauración del emplazamiento. Pueden conllevar una reducción temporal de la seguridad, de la aptitud para el servicio o del uso y explotación de la obra en alguno de sus tramos o del área portuaria.

OTRAS FASES Y SUBFASES

Se pueden definir otras fases o subfases cuando la entrada en servicio de la obra sea parcial, o si durante una fase se esperen situaciones de especial relevancia para la seguridad, la aptitud para el servicio o la operatividad del dique o de algunos de sus tramos.

Duración de una fase

La duración de cada una de las fases de proyecto debe determinarse por el promotor considerando diferentes razones, entre ellas, constructivas, de comportamiento de los materiales o del terreno, de conservación, funcionales y de servicio, económicas, administrativas y legales.

La fase de servicio finaliza con el inicio del desmantelamiento y, por tanto, delimita la vida útil de la obra (ver PIANC, 2016). La ROM I.0-09 en su apartado 2.4.2.2, fija la duración mínima, (V), de ésta en

- (a) $V \leq 5$ años para diques y tramos provisionales; y
- (b) $V > 5$ años para diques y tramos definitivos.

La posible extensión de la vida útil de una obra más allá de la inicialmente proyectada requerirá, al menos, una verificación de los requisitos de proyecto en la nueva fase de servicio. Dicha verificación tendrá en cuenta, entre

otros, la revisión de los índices IRE, ISA, IREO e ISAO, información actualizada del clima marítimo y su interacción con la obra, el historial del daño acumulado por los distintos modos, las reparaciones efectuadas y el estado de la obra al final de la anterior fase de servicio.

DURACIÓN DE UNA SUBFASE

La duración de una subfase se determina de forma análoga a la de las fases de proyecto. Si la subfase se debe a la entrada parcial en servicio, su duración no excederá el 5% de la duración de la fase de servicio con un máximo de 5 años. No obstante, si la subfase se debe a la ocurrencia de situaciones de especial relevancia para la seguridad, la aptitud para el servicio o la operatividad del dique, su duración estará en correspondencia con la duración de aquellas.

Jerarquía de escalas temporales en una fase de proyecto

A lo largo de una fase, los factores de proyecto y, en especial, los agentes climáticos, presentan ciclos de variabilidad a diferentes escalas, entre los que cabe considerar los siguientes (ROM 0.0-01, apartado 2.4.2 y ROM 1.0-09, apartado 2.4.2),

- (a) Ciclo plurianual,
- (b) Año meteorológico,
- (c) Ciclo estacional,
- (d) Ciclos de calma y solicitación,
- (e) Estado meteorológico,
- (f) Manifestación básica de un agente climático (p. ej., ola individual en un estado).

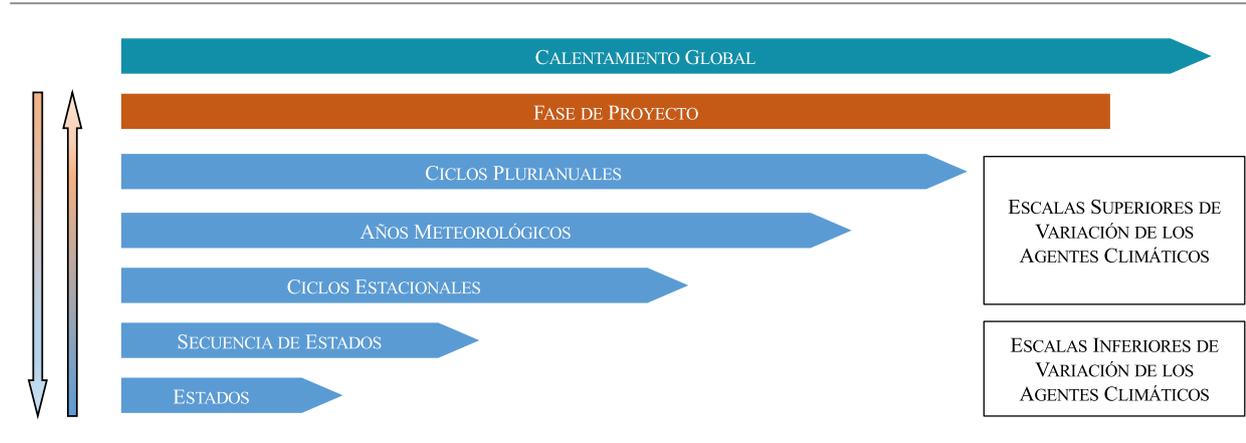
Ciclo vital del dique y adaptación a las consecuencias del calentamiento global

El ciclo vital del dique se inicia en el momento en el que se aprueba el Proyecto de Construcción. Si aquel es igual o mayor que 50 años, el proyecto debe integrar y verificar las consecuencias del calentamiento global en la finalidad, seguridad y operatividad del dique, cuantificando la evolución espacio-temporal de los modelos de probabilidad marginal, condicionada y conjunta de los agentes climáticos y de sus acciones.

COMENTARIO

El estado meteorológico es, por definición, el intervalo de tiempo en el que se admite que la manifestación de los agentes climáticos, sus acciones y la respuesta estructural o funcional del dique es estacionaria en sentido estadístico. Por ello, en general el estado es el intervalo básico de tiempo en el que se verifican los requisitos de proyecto y la finalidad del dique de abrigo. Las secuencias de estados, con sus distintas escalas de variación, ciclos, años, etc., condicionan el desencadenamiento y la evolución de las averías, las operaciones de reparación, los niveles de operatividad y el balance económico-financiero de la actividad portuaria (ver ROM 1.0-09, apartado 3.1.3).

Figura 2.2: Jerarquía de escalas temporales del proyecto



2.2.2 Organización espacial: tramos

La definición y caracterización espacial de un dique se puede realizar por tramos. Un tramo es una parte continua del dique en la que los valores característicos de los agentes climáticos y del terreno pueden considerarse uniformes y su evolución temporal es simultánea y compatible. Se caracteriza por su tipología formal y estructural, si bien sus dimensiones geométricas pueden variar de forma gradual para adecuarse a los cambios suaves de la batimetría y de las propiedades del lecho.

Tramos de un dique abrigo

Se identifican, entre otros, los siguientes tramos,

- ◆ Arranque: tramo en el que comienza el dique, bien desde tierra firme, bien desde una obra marítima existente, o bien en el agua en el caso de un dique exento; (el arranque desde otro dique también se puede considerar como una transición);
- ◆ Alineación principal: tramo que proporciona abrigo y control frente al oleaje predominante;
- ◆ Alineaciones secundarias y cambios de alineación: tramos que dan continuidad a la traza del dique desde el arranque hasta el morro;
- ◆ Morro: tramo en el que finaliza la traza del dique;
- ◆ Transiciones: tramos que presentan cambios en su geometría, en general, asociados a variaciones longitudinales significativas de algunos de los requisitos de proyecto o de los agentes y acciones de proyecto.

TRANSICIONES Y SUBTRAMOS

Se recomienda adoptar un tramo de transición o un subtramo cuando se esperen cambios bruscos en, (1) los agentes climáticos o terreno, (2) la batimetría y la naturaleza del lecho, (3) la alineación y la tipología o en alguna de sus partes y elementos y (4) en su finalidad.

De forma específica es conveniente adoptar un tramo de transición siempre que,

- (a) las repercusiones económicas o sociales y ambientales medidas por el carácter general o el carácter operativo de dos tramos consecutivos sean significativamente diferentes; o que
- (b) la variabilidad longitudinal (a lo largo de la traza del dique) de los descriptores de estado de alguno de los agentes predominantes exceda en un 10-20% el valor medio de tramo (p. ej., la altura de ola significativa o la dirección predominante, la presencia de corrientes, etc.).

Deslinde del tramo

El deslinde de un tramo se puede determinar en función de la variabilidad espacial de los agentes climáticos (oscilaciones del mar) y de las propiedades del terreno, considerando la forma en planta del dique y las isolíneas de los valores umbrales que definen los ciclos de operatividad y los ciclos de solicitud del dique en el entorno del área portuaria. Así mismo, se debe tener en cuenta la variabilidad espacial del comportamiento del terreno (capacidad portante y deformabilidad) y de la cimentación del dique frente a las acciones del oleaje y otros agentes de proyecto.

Estos cálculos deben de apoyarse en las técnicas estadísticas de transformación (downscaling) de los agentes a partir de la información albergada en las bases de datos climáticas.

INFLUENCIA DE LA DINÁMICA DEL OLAJE EN EL DESLINDE DE LOS TRAMOS

La dinámica del oleaje en el emplazamiento y los procesos de interacción del oleaje con el dique, planta y sección, pueden ser determinantes en el deslinde de los tramos del dique. En particular se tendrá en cuenta que la interacción del dique y el oleaje incidente,

- (a) cambia las dimensiones de la zona de rompientes y la forma de la rotura de las olas en el frente y pie del dique, (ver apartado 3.4.6 de la ROM 1.0-09);
- (b) genera variaciones espacio-temporales (amplitud y fase) de las olas en el frente, pie y sobre el dique cuando, (a) se encuentran con oblicuidad y (b) hay cambios bruscos de tipología, de la geometría de la sección o condiciones de borde, tal y como ocurre principalmente en el arranque, el morro y los cambios de alineación.

COMENTARIO

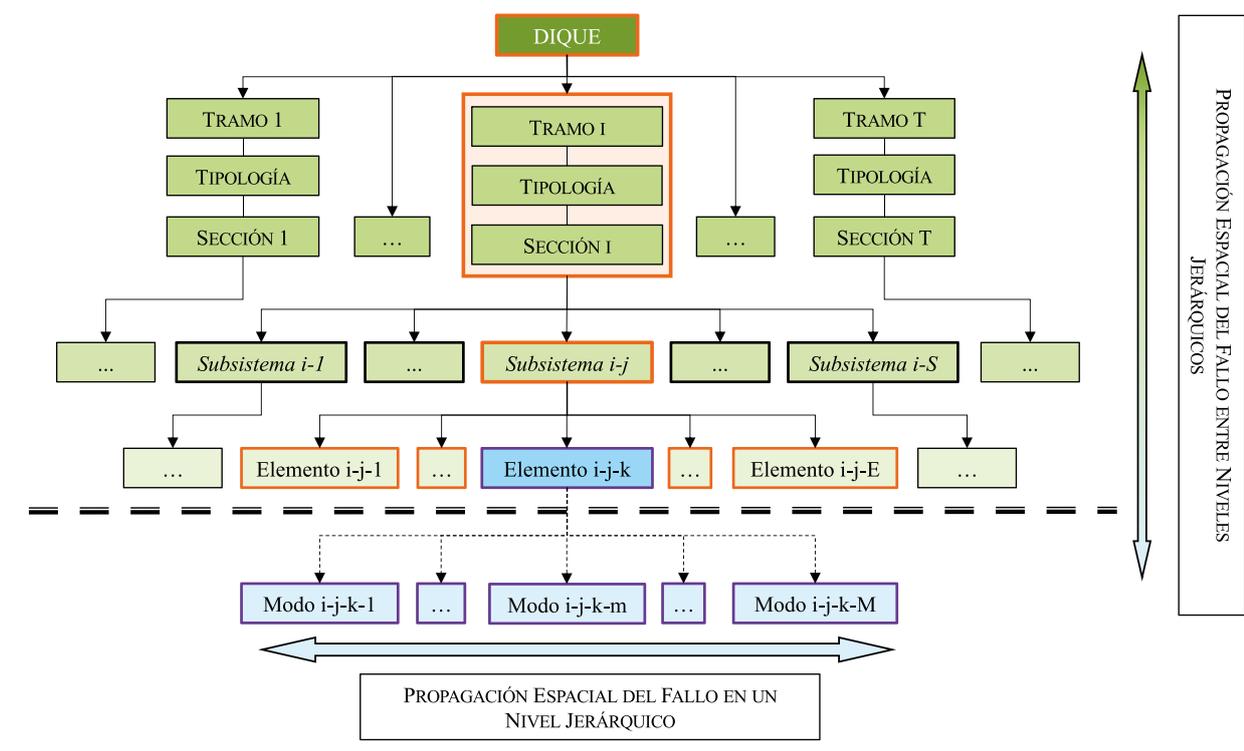
La relevancia de aquellas variaciones espacio-temporales depende, entre otros, del ángulo de incidencia del oleaje, de la profundidad relativa, h/L_i , y de la tipología, donde L_i es una longitud de onda característica del oleaje y h una profundidad representativa del tramo.

En estas circunstancias, la longitud del tramo se debe determinar en función del monomio adimensional, l/L_i , bien resolviendo las ecuaciones elípticas de propagación de ondas mediante modelos numéricos (p. ej., MSPE, ver ROM 1.0-09 apartado 3.4.3.1), o bien experimentalmente en tanque con generación de oleaje direccional. En una primera aproximación, es conveniente delimitar, a un lado y a otro de la sección que origina la variabilidad longitudinal, una longitud mínima del tramo, $l > 2L_i$. Este deslinde debe verificarse en el Anteproyecto.

Jerarquía de escalas espaciales en un tramo

Un tramo de dique se define por sus dimensiones en planta y una determinada tipología caracterizada por una geometría y una configuración formal y estructural. Ésta, considerada como un sistema, puede descomponerse en unidades de menor escala denominadas subsistemas y éstas, a su vez, en los elementos estructurales, y así sucesivamente. Su comportamiento frente a la acción de los agentes se pueden analizar siguiendo la jerarquía de escalas espaciales: por subsistemas, elementos y así sucesivamente. Habitualmente, el comportamiento de cada una de ellos se describe y cuantifica (a esa escala) por uno o varios formas o mecanismos que pueden afectar (a esa escala) la seguridad y el uso y explotación del tramo. En la figura 2.3 se representa esta jerarquía (o reparto en cascada) espacial para el análisis y evaluación del comportamiento del tramo.

Figura 2.3: Distribución en cascada del comportamiento de un tramo de dique



2.3 COMPORTAMIENTO DEL TRAMO POR ESTADOS DE OBRA

La escala temporal de las formas o mecanismos que pueden afectar a la seguridad y el uso y explotación de un tramo se pueden describir por estados de obra (o de tramo). Su caracterización incluye,

- un espacio muestral y de sucesos
- los modos de fallo y de parada
- el conjunto completo de modos
- el espacio de sucesos y los diagramas de componentes

2.3.1 Espacio muestral y de sucesos

El espacio muestral caracteriza de forma inequívoca el estado de un tramo. En él se puede identificar un subconjunto de posiciones que delimitan cada uno de los posibles sucesos (habitualmente modos de fallo o parada) cuya ocurrencia aislada o conjunta conduce al incumplimiento de los objetivos de proyecto en un tramo del dique.

En su caso, y con la debida justificación, el análisis de los incumplimientos de los objetivos de proyecto se puede realizar mediante otros espacios muestrales que no utilizan los modos de fallo y de parada operativa.

2.3.2 Modos de fallo y de parada

Un modo define la manera, forma o mecanismo en que puede producirse el fallo o la parada operativa.

Caracterización de los modos de fallo o parada

De acuerdo con el apartado 2.3.2 de la ROM 1.0-09, la caracterización de un modo se elabora, entre otros, considerando los siguientes elementos,

- (a) dominios espacial y temporal y partes y elementos de la sección a los que afecta;
- (b) agentes predominantes y otros agentes: diagramas de simultaneidad;
- (c) mecanismo o forma como ocurre y acciones que provoca, observación y métrica;
- (d) formas de verificación y, en su caso, ecuación de verificación, formato y resolución;
- (e) consideración como modo principal y dependencia estadística con otros modos;
- (f) evolución espacio-temporal del modo: proceso acumulativo estado por estado, niveles de avería desde su inicio hasta su destrucción o, en su caso, reparación (ver Artículo 2.4), y, en su caso potencial desencadenamiento de otros modos.

La descripción de un modo de parada incluirá, además de los elementos anteriores, las posibles actuaciones a realizar para reducir la recurrencia, la duración y las consecuencias del modo de parada operativa.

COMENTARIO

La caracterización de un modo se fundamenta en la hipótesis de uniformidad estadística de los agentes, acciones y respuesta en el tramo y de su estacionariedad en el intervalo de tiempo (estado). Los agentes climáticos concomitantes del rebase o de la erosión de la berma de pie son: oleaje, nivel del mar (marea astronómica y meteorológica), viento y corriente.

DOMINIOS ESPACIAL Y TEMPORAL DE MODOS PROVOCADOS POR AGENTES CLIMÁTICOS O DEL TERRENO

La caracterización espacial de los modos de fallo y de parada de un tramo provocados por los agentes climáticos o del terreno la parte de la sección (cimentación, cuerpo principal o superestructura, etc.) en la que puede presentarse y los elementos a los que puede afectar.

Cuando los agentes climáticos son los predominantes o intervienen de forma significativa en la causa del modo, el dominio temporal para su caracterización es el estado meteorológico. No obstante, es posible adoptar otras escalas temporales, bien superiores, por ejemplo, un ciclo de solicitación, bien inferiores, por ejemplo, la ola individual.

DIAGRAMA DE AGENTES PREDOMINANTES

Si hay más de un agente predominante, es conveniente elaborar un diagrama en serie de las diferentes combinaciones de agentes simultáneos que participan significativamente en el desencadenamiento y en la evolución espacio-temporal de un modo de fallo o de parada. En general, la concomitancia de los agentes y sus valores umbrales para el inicio y la propagación del modo se determina mediante su función de probabilidad conjunta.

MECANISMO, OBSERVACIÓN Y MÉTRICA

Es conveniente que la descripción de un modo incluya, (1) la forma o manera en la que se desencadena y los procesos que participan en su evolución espacio-temporal y (2) la técnica de observación y las magnitudes (dimensiones geométricas, característica del material, número de piezas desplazadas, etc.), que se aplican para caracterizar el nivel de avería del modo. En estos casos, se debe establecer, a priori, la correspondencia biunívoca entre el nivel de avería (o parada), y las magnitudes observadas y medidas. Esta correspondencia depende del modo y del nivel de avería o de parada.

FORMAS DE VERIFICACIÓN

Dependiendo del modo, principal o no principal, y del grado de desarrollo del proyecto, la ocurrencia del modo se verifica mediante uno de los siguientes métodos,

- (a) la resolución de una ecuación de verificación formulada en función de,
 1. los valores umbrales de los agentes predominantes que desencadenan el modo de fallo o de parada, y
 2. las combinaciones de agentes y acciones que intervienen en el mecanismo o modo de fallo o de parada;
- (b) la experimentación *in situ* o en laboratorio para unas condiciones de trabajo específicas;
- (c) la aplicación de normas de buena práctica o de otras normas e instrucciones.

2.3.3 Conjunto completo de modos

Está formado por la colección de mecanismos cuya ocurrencia aislada o conjunta conduce al incumplimiento de los requisitos (objetivos) de proyecto. Este conjunto, por ser completo, describe de forma unívoca todas las posibles formas de fallo o de parada operativa relacionadas indistintamente con la seguridad estructural y formal y la operatividad del área portuaria causados, principalmente, por su interacción con los agentes climáticos, hidráulicos, terreno y de uso y explotación.

Modos mutuamente excluyentes y modos dependientes

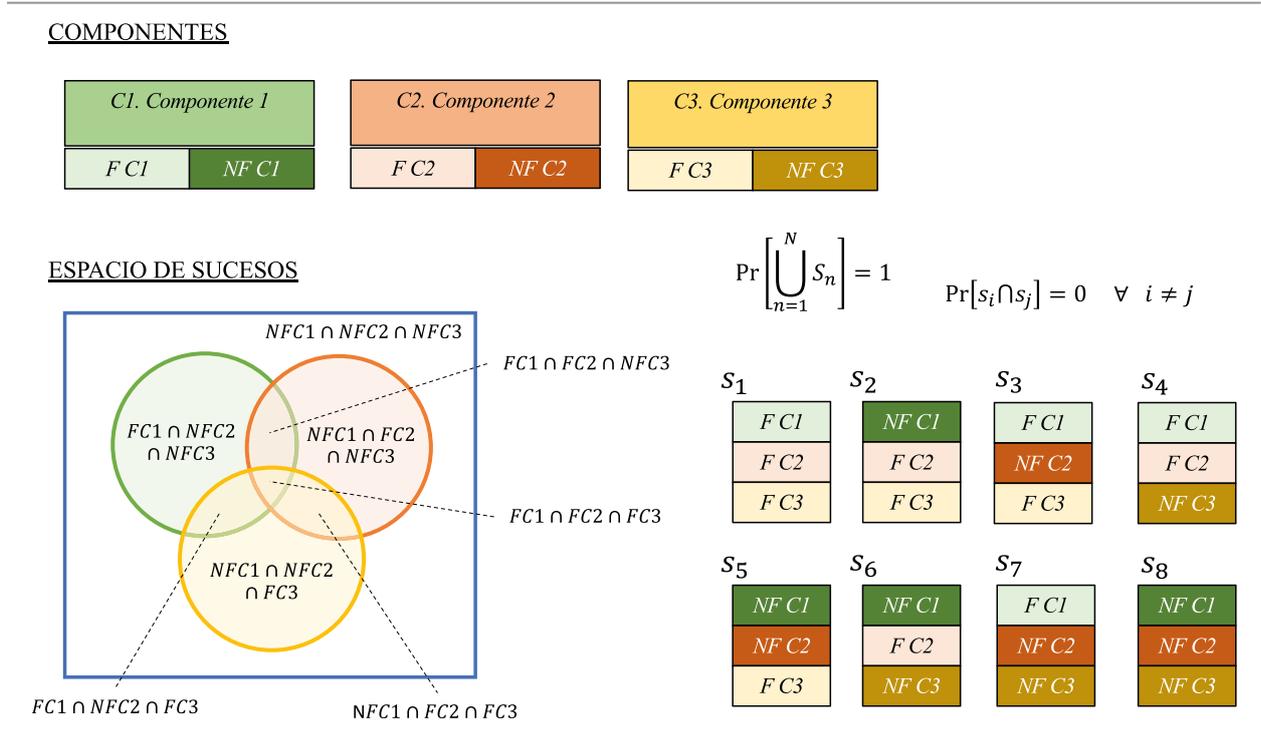
Un grupo de modos son mutuamente excluyentes si la ocurrencia de cada uno de ellos excluye la ocurrencia de los otros modos (su intersección es el conjunto vacío). En otro caso, los modos se consideran no excluyentes y tendrán, o no, dependencia estadística.

Dos modos que no son mutuamente excluyentes son independientes en sentido estadístico si su probabilidad conjunta es igual al producto de sus probabilidades marginales. En otro caso se consideran dependientes y estarán correlacionados positiva o negativamente. Si la correlación es positiva, el fallo o parada de un modo guarda relación con el fallo o parada del otro. Si la correlación es negativa, el fallo o parada de un modo guarda relación con el no fallo o no parada del otro.

2.3.4 Espacio de sucesos y diagramas de componentes

Determinado un conjunto de modos con los que puede fallar o parar un tramo de dique, el espacio de sucesos describe el conjunto de todas las posibles combinaciones de estos modos que pueden darse simultáneamente en un estado como resultado de la comprobación del estado de la obra (ver apartado 2.7.1 de la ROM 1.0-09). Es conveniente representar las combinaciones de modos que constituyen el espacio de sucesos mediante diagramas de Venn (figura 2.4).

Figura 2.4: Espacio de sucesos para un conjunto de tres componentes



COMENTARIO

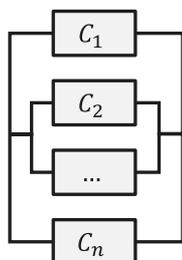
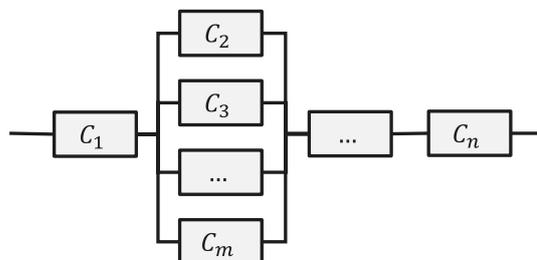
En la figura 2.4 se muestra un conjunto de tres componentes y un diagrama de Venn en el que se representa el espacio posible de sucesos en función de si estos componentes se encuentran en situación de fallo o no fallo (o en parada u operativo). La probabilidad del conjunto del espacio de sucesos es la unidad, siendo la intersección de cada suceso nula. En la zona inferior derecha se representan las posibles combinaciones con las situaciones en las que pueden hallarse las distintas componentes, que se corresponden con cada una de las áreas del diagrama del Venn, que son representaciones gráficas de las relaciones que tienen los elementos o las partes en su conjunto.

Diagramas de componentes y concepción formal y estructural del tramo

Los diagramas de componentes ayudan a comprobar el estado de la obra (tramo) en un dominio temporal concreto. Definen las posibles combinaciones de modos de fallo o de parada operativa que pueden ocasionar el incumplimiento de los requisitos (objetivos) de proyecto.

La configuración de un diagrama de componentes revela la razón y ser de la infraestructura y sus tramos y su espacio de sucesos. Su empleo como herramienta para el cálculo de la probabilidad de fallo o parada debe considerar, además, las relaciones de exclusión o dependencia entre sus componentes. En general, será suficiente trabajar con tres tipos de diagramas (ver figura 2.5):

- (a) en serie,
- (b) en paralelo,
- (c) mixto, con componentes en serie y en paralelo.

Figura 2.5: Tipologías de diagramas de componentes*Diagrama en Serie**Diagrama en Paralelo**Diagrama Mixto (ejemplo)*

En un diagrama en serie el sistema falla o incumple los objetivos del proyecto si lo hace, al menos uno de sus componentes. Para que, en un diagrama en paralelo, el sistema falle o incumpla los objetivos del proyecto deben ocurrir simultáneamente las situaciones que describen los componentes del diagrama. Un diagrama con componentes en serie y paralelo permite considerar situaciones en las que el incumplimiento de los objetivos del proyecto puede asociarse, al menos a un solo componente, o al incumplimiento simultáneo de un grupo de ellos.

Estos diagramas tienen su utilidad durante la concepción del dique y el reparto de la probabilidad de fallo, el cálculo de la fiabilidad del tramo, la definición de las estrategias de reparación y la configuración de los árboles de decisión.

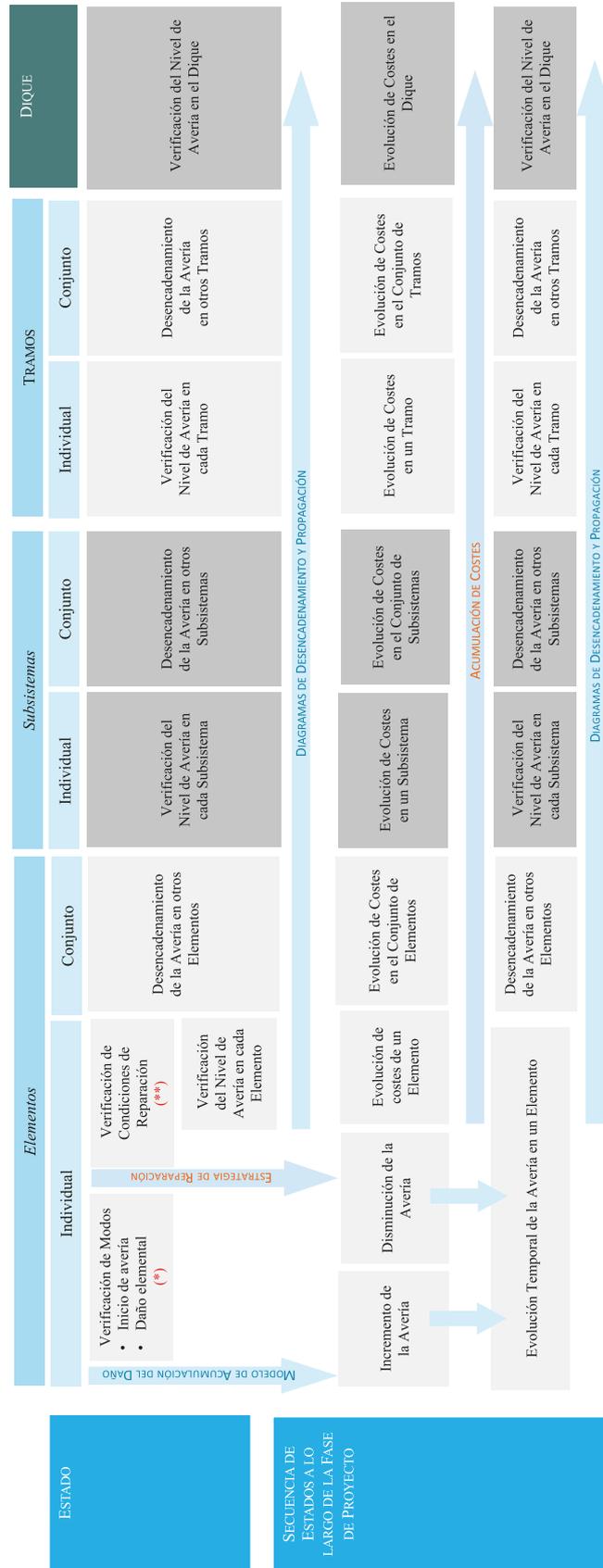
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA AVERÍA

En esta ROM se considera el diseño de un dique de abrigo a niveles avanzados de avería. Para ello se proponen modelos de acumulación del daño, desde el inicio del mismo hasta la destrucción, que, en general, se aplican a nivel de estado (dominio temporal). La verificación de la obra en una fase de proyecto incluye la integración, estado por estado, de su respuesta frente a los agentes y de la acumulación de la avería.

Uno de los resultados de este método de trabajo es la evolución espacio-temporal de los diferentes modos de fallo en cada tramo, sus consecuencias y sus costes. Al unificar la verificación de los modos adscritos a los estados límite últimos y de servicio, se homogeneiza, asimismo, la toma de decisiones y el cálculo del nivel de riesgo de la inversión.

En la figura 2.6 se presenta un resumen de este método de trabajo y las principales herramientas para su puesta en práctica.

Figura 2.6: Esquema para evaluar la acumulación de la avería y sus consecuencias



* (ECUACIONES DE VERIFICACIÓN)
 ** (ESTRATEGIA DE REPARACIÓN)

2.4.1 Modelo conceptual del progreso temporal del nivel de daño acumulado

En este Artículo se presentan algunos modelos simples para analizar la evolución temporal del nivel de daño y del tiempo de parada en función de la evolución temporal del agente predominante. El resultado es la curva de estado del daño acumulado. Su descripción matemática debe satisfacer ciertas condiciones de compatibilidad temporal tal y como se detalla más adelante.

Un modelo conceptual de evolución del daño acumulado deberá contener, al menos, los siguientes componentes,

- (a) descripción del daño y su forma de acumulación,
- (b) modelo de probabilidad de los niveles de daño,
- (c) relaciones paramétricas entre agentes y acciones, ecuación de verificación según el nivel de la avería, y, en su caso,
- (d) modelo de la magnitud del daño inicial condicionado a la magnitud de los agentes y acciones,
- (e) la forma integral de la acumulación de la avería para poder aplicar un modelo gaussiano.

Descripción del daño por curvas de estado

La avería de un componente de un dique se debe describir por medio de una o más magnitudes observables y medibles que permitan cuantificar su importancia y nivel de progreso. Alcanzados los valores umbrales de los agentes predominantes que desencadenan e inician el modo, el progreso de la avería depende de la evolución temporal de aquellos agentes y de la respuesta formal y estructural de la sección. En función de ellos y de las magnitudes observadas, la evolución temporal del daño acumulado, se puede describir de forma esquemática por,

- (a) una secuencia de estados de equilibrio (dinámico),
- (b) una curva continua creciente e ilimitada,
- (c) un comportamiento mixto.

En el primer caso, cada nivel de avería es un estado formal y estructural “de equilibrio”, y permanece en él mientras que no aumenten significativamente los valores de los agentes y de las acciones que lo provocaron.

En el segundo caso, la avería progresa indefinidamente sin aumentar el valor umbral de cada uno de los agentes predominantes y depende, principalmente, de su persistencia. En algunos casos, la avería puede progresar incluso con valores de los agentes predominantes inferiores a los umbrales que lo iniciaron.

El comportamiento mixto describe el progreso del daño acumulado mediante una secuencia de estados de equilibrio seguida, sin solución de continuidad, de un progreso ilimitado o viceversa.

En todos los casos, las condiciones de contorno de los elementos afectados son un límite a la evolución del daño y, en consecuencia, influyen en la forma de progresión de la avería y en la posibilidad de alcanzar estados de equilibrio en la evolución del daño.

COMENTARIO

Es habitual admitir que la evolución espacial de la pérdida de piezas del manto principal finaliza cuando se hace visible el manto secundario; entonces, se declara que la estructura ha alcanzado el nivel de avería de destrucción. Dependiendo de la morfología de la sección, la destrucción puede ocurrir sin que la geometría del manto alcance estados de equilibrio intermedios (modelo escalón).

Cuando la sección del dique se construye toda ella con un solo elemento (p. ej., piedra de escollera natural o sobre un todo uno de cantera sin mantos intermedio), la salida de las piedras y su recolocación en el perfil suele formar geometrías de equilibrio que se mantienen estables mientras que no se incrementa la acción del oleaje que las creó. En estos casos, si se cumple con los objetivos y los condicionantes de proyecto, se puede considerar que la destrucción del dique se alcanza cuando se abre una brecha (que se extiende desde barlomar hasta sotomar) por la que se propaga el oleaje al interior del área portuaria y se quiebra la continuidad de la obra lineal. El daño en diques de abrigo y su evolución se puede consultar en numerosos trabajos que analizan resultados de ensayos experimentales y numéricos, véase a modo de ejemplo [Benedicto \(2004\)](#), [Maciñeira \(2005\)](#), [Clavero \(2007\)](#), [Guanche \(2007\)](#), [Gómez-Martín \(2015\)](#) y [Campos \(2016\)](#).

Estados de equilibrio y niveles de avería

Es conveniente identificar, al menos, los siguientes niveles de avería,

- (a) no fallo,
- (b) inicio del fallo,
- (c) niveles de evolución del fallo, y
- (d) estado de destrucción.

El inicio de fallo debe identificar y cuantificar, sin ambigüedad, un estado de la avería mediante una, o más, magnitudes observables y medibles, p. ej. el valor mínimo del número de piezas desplazadas en una zona, o la variación de la geometría (distancia, profundidad, área, etc.), de un sistema granular, los movimientos (traslaciones y giros) del sólido rígido, etc. En los Estudios Previos el inicio del fallo se debe elegir a priori y se determina de forma precisa y se elige (decide) durante los estudios de optimización y sensibilidad de la infraestructura. Esta elección del inicio de avería está vinculada con la estrategia de conservación y reparación (árboles de decisión) y ésta con los costes totales del proyecto que condicionan los objetivos del Proyecto de Construcción y el riesgo financiero y económico del Proyecto de Inversión.

El estado de destrucción se asocia al agotamiento resistente del elemento, subsistema o partes de la sección y, eventualmente, del tramo y otros tramos del dique. Con la declaración del estado de destrucción se admite que la obra no cumple los objetivos del proyecto y previene de una intervención inmediata que evite la destrucción de la obra. En el laboratorio se conjetura la destrucción cuando se entrevé que la progresión de la avería sólo depende del número de olas que arriban a la sección.

Cuando el daño progresa indefinidamente, sin que exista un agotamiento resistente, rotura, etc. de la componente estudiada, es conveniente seleccionar/acotar un nivel “máximo admisible” de avería equiparable a la destrucción con unos supuestos de intervención inmediata para evitar la destrucción de la obra.

Cuando el comportamiento del daño es mixto, se debe determinar los niveles de avería en los que se espera un cambio de comportamiento en la evolución del daño y, en su caso, seleccionar/acotar un nivel de avería “máximo admisible”.

Aleatoriedad de la respuesta estructural y modelo de probabilidad

Cada nivel de daño debe asociarse con las combinaciones de valores de los agentes predominantes que lo provocan, considerando que, para cada combinación, la respuesta de la estructura es un proceso aleatorio descrito por una función de probabilidad.

El modelo de probabilidad de la magnitud (física) que describe el nivel de avería o de parada se estima mediante ajuste estadístico de los datos disponibles. Estos datos se pueden obtener mediante experimentación en el laboratorio o *in situ*, o mediante modelos numéricos o analíticos. En todos los casos el desarrollo del experimento y su escala temporal deben ajustarse a las necesidades del proyecto.

Si no se dispusiera de datos, se puede admitir, como primera aproximación, que las deformaciones geométricas acumuladas, los desplazamientos acumulados y los movimientos acumulados como sólido rígido de partes y elementos de diques de abrigo siguen un modelo de probabilidad gaussiano. En este supuesto, el valor medio del daño crece al aumentar los valores de los agentes predominantes, y su varianza crece para los niveles inferiores de avería, pero se suele estabilizar para niveles avanzados de la avería.

Aleatoriedad del daño inicial

Lo usual es que los valores de los agentes y de las acciones que provocan el inicio de avería sean variables aleatorias con un modelo de probabilidad. Sus parámetros (media y varianza) dependen de los agentes (magnitud y duración) y su variabilidad, del modo y de la tipología. Estos valores son el punto de partida de las curvas de acumulación del daño y puede, a priori, no estar controlado por los mismos mecanismos que rigen la acumulación. Por su importancia en el modelo de acumulación del daño, estos mecanismos deben caracterizarse de forma específica e independiente.

2.4.2 Curvas de estado del daño medio acumulado

La descripción de la evolución del daño se concreta, entre otras, mediante alguna o algunas de las siguientes curvas de acumulación de daño medio,

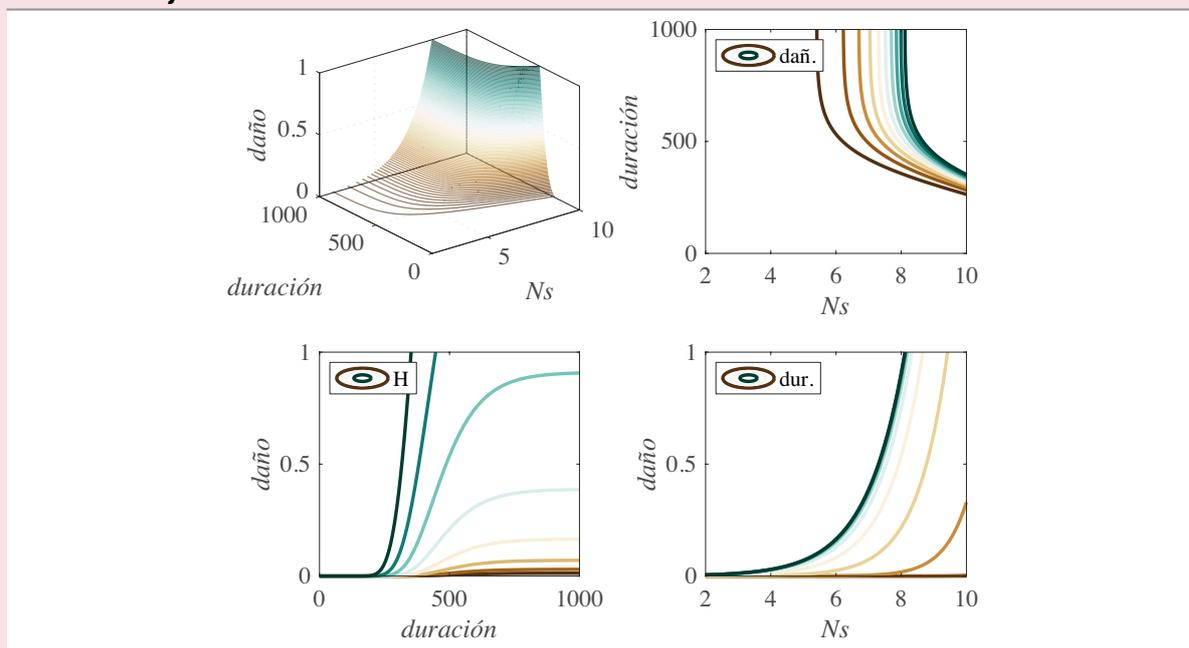
- (a) curvas de iso-duración en función de la magnitud característica del agente predominante y del daño medio acumulado,
- (b) curvas de iso-daño medio acumulado en función del valor característico del agente predominante y la duración,
- (c) curvas de iso-valor característico en función de la duración y del daño medio acumulado.

Si el agente predominante es el oleaje, es conveniente que el comportamiento de la avería se describa en función del estado meteorológico, incluyendo, al menos, su duración, el número de estabilidad (variable adimensional) asociado a la altura y el periodo de ola característicos y los niveles del mar concomitantes.

COMENTARIO

En la siguiente figura se muestran algunos ejemplos de curvas de daño medio: en el panel superior izquierdo, la superficie definida por las variables daño, duración y valor característico del agente; en el panel superior derecho, las curvas de iso-daño medio acumulado en función del valor característico del agente predominante y la duración; en el panel inferior izquierdo, las curvas de iso-valor característico en función de la duración y del daño medio acumulado; finalmente, en el panel inferior derecho, las curvas de iso-duración en función de la magnitud característica del agente predominante y del daño medio acumulado.

Figura 2.7: Curvas de estado del daño medio acumulado. N_s = número de estabilidad asociado a la altura de ola característica del estado de oleaje; d = daño medio acumulado; dur = duración característica del estado de oleaje



La selección de las curvas de daño medio acumulado debe apoyarse en una correcta conceptualización teórica de los procesos y, en su caso, en la experimentación física en el laboratorio o *in situ*. En este caso, se sustentará en el análisis dimensional y las condiciones de compatibilidad temporal (tal y como se detalla más adelante). Además, se debe tener en cuenta que, con amplia generalidad, la evolución temporal de la función de probabilidad del daño acumulado satisface el teorema del límite central (ejemplo en la sección 2.4.3).

Curvas de iso-duración en función del agente predominante y del daño medio acumulado

En general, la función del daño acumulado (y su incertidumbre) crece al aumentar la acción de los agentes predominantes que inician el fallo. El nivel del daño medio acumulado se puede describir mediante funciones matemáticas continuas, o por escalones, de los agentes o acciones (o términos) predominantes. Si el agente predominante es el oleaje, la altura de ola suele ser la variable principal y el periodo y el nivel del mar los parámetros característicos de la función o curva de evolución.

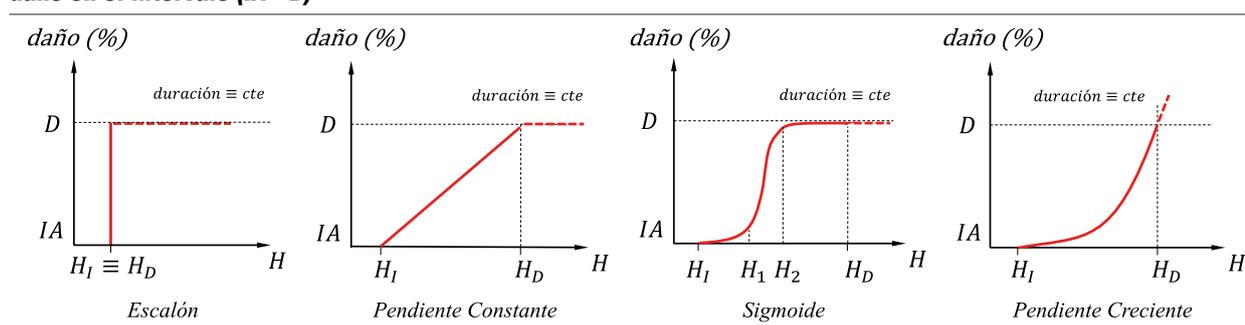
Esta curva ayuda a definir los intervalos de: (a) inicio-destrucción para un nivel de avería, o (b) de operatividad completa-parada total para un nivel de operatividad. Los valores de los agentes principales que acotan el intervalo de inicio-destrucción deben quedar bien definidos con el fin de decidir y posibilitar la intervención antes de que se produzca la destrucción de la obra. Se debe analizar si la evolución del modo es tridimensional incluyendo la información suficiente para su cuantificación, por ejemplo, dimensión longitudinal del modo, número máximo de piezas en el volumen, etc.

Algunos tipos de funciones (ver figura 2.8) que pueden emplearse para caracterizar estas curvas son:

- (a) **Escalón.** Asocia el inicio de avería y la destrucción para el mismo valor del agente predominante. Es un modelo binario, fallo-no fallo, parada operativa-no parada operativa para un modo adscrito a un estado límite último o a un estado operativa, respectivamente. Se puede aplicar a los proyectos de construcción de IRE e ISA bajos, se verifican por métodos del Nivel I y su inversión es menor que C_0 (magnitud de adimensionalización del coste en España).

- (b) **Curva de pendiente constante.** Establece una relación lineal entre el valor del agente predominante y el nivel de daño. Se determina mediante dos pares de valores (H_I , IA) y (H_D , D), donde IA y D identifican los estados de la obra de inicio de avería y destrucción respectivamente; H_I y H_D son los valores del agente para el que se alcanza el nivel de avería. La pendiente de la recta es una medida de la capacidad resistente residual de la sección (resiliencia) frente a la destrucción. Este modelo representa un dique con capacidad resistente residual constante. El modelo escalón representa un dique sin capacidad resistente residual o no resiliente.
- (c) **Función tipo sigmoide (por ejemplo, tangente hiperbólica).** En este modelo se identifican tres regiones de daño o de pérdida gradual de operatividad, en función de su capacidad resistente residual, (1) región con una alta capacidad resistente, poco sensible a la variación del agente, (2) región con baja capacidad resistente, muy sensible a pequeñas variaciones del valor del agente, y (3) región en la que se recupera una alta capacidad resistente hasta alcanzar la destrucción. En general, la capacidad resistente residual de un dique de abrigo depende de su capacidad de deformarse y de las modificaciones que provoca en el agente.
- (d) **Función de pendiente creciente (por ejemplo, potencial o exponencial).** Define una tasa creciente e ilimitada de la magnitud del daño con el valor del agente. El valor del agente predominante correspondiente a una pendiente suficientemente elevada facilita elegir los valores asociados a los niveles de avería de destrucción.

Figura 2.8: Curvas de iso-duración en función del agente predominante y el daño medio acumulado. IA = inicio de avería; D = destrucción; H = altura de ola característica del estado de oleaje; H_I = altura de ola característica de IA; H_D = altura de ola característica de D; H_1 , H_2 , alturas de ola características de estados de evolución de daño en el intervalo (IA - D)



CONSIDERACIONES SOBRE EL PROGRESO INDEFINIDO DE LA AVERÍA

Durante la concepción de la obra se debe identificar las condiciones del agente principal y los tramos en los que la avería, una vez iniciada, puede crecer indefinidamente hasta la destrucción. Este comportamiento suele presentarse cuando la deformación de la sección no modera la acción del agente ya que los elementos movilizados se trasladan fuera de ella.

Este comportamiento se observa cuando la avería ocurre en, (1) un tramo recto por la acción de un tren de olas con incidencia muy oblicua; (2) en el morro, un cambio de alineación o el arranque. En estos casos, es conveniente modelar la evolución de avería mediante rectas de fuerte pendiente o por un escalón.

COMPORTAMIENTO MIXTO DE ALGUNOS MODOS DE FALLO

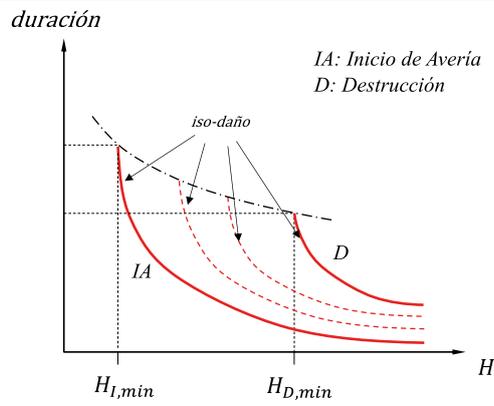
En algunas tipologías, partes o elementos del dique la evolución del daño puede describirse mediante un patrón mixto: primero se manifiesta por uno o varios estados de equilibrio, seguido, de manera súbita, por la destrucción. Este comportamiento es habitual en mantos monocapa, piezas esbeltas del manto principal, berma de protección, etc. En estos casos, es conveniente que el modelo de evolución de la avería incluya los valores umbrales de, (1) inicio, (2) cambio de comportamiento y (3) destrucción de los agentes predominantes, p. ej. una sigmoide con tres dominios bien definidos. Es prudente verificar los umbrales mediante experimentación en el laboratorio y, en

cualquier caso, necesario cuando el IRE e ISA supera los umbrales recogidos en el Artículo 1.4, o el Proyecto de Inversión es de clase II.

Curvas de iso-valor del daño medio en función del agente predominante y la duración

Describen la relación entre el valor característico del agente predominante y la duración (persistencia) requerida para provocar un determinado iso-valor del daño, consignando los valores umbrales del agente que causan un determinado nivel de daño.

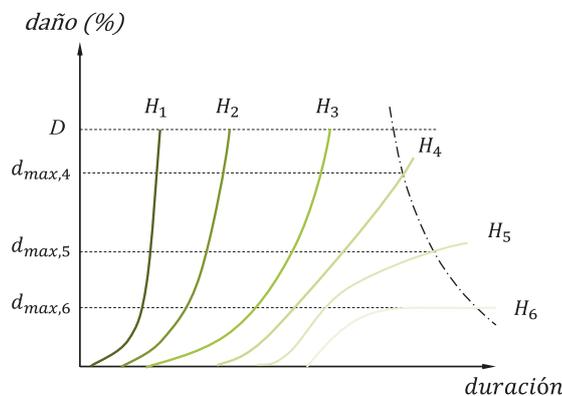
Figura 2.9: Curvas de iso-valor del daño medio acumulado en función del agente predominante y la duración.
 $H_{I,min}$ = altura de ola característica (con duración mínima $t_{I,min}$), necesaria para que se alcance el estado de IA.
 $H_{D,min}$ = altura de ola característica (con duración mínima $t_{D,min}$), necesaria para que se alcance el estado de D



Curvas de iso-valor característico del agente en función de la duración y el daño acumulado

Describen, para cada valor característico del agente predominante, el daño acumulado en función de la duración de la sollicitación. Permiten caracterizar la duración mínima de una magnitud del agente para alcanzar un determinado nivel de daño.

Figura 2.10: Curvas de iso-valor característico del agente característico (altura de ola H_1, H_2, \dots), en función de la duración y el daño medio acumulado D. Donde -.- es la línea que separa las regiones en las que estados de oleaje característicos, H_1, H_2, H_3 con una duración acotada pueden producir el nivel de avería de destrucción



Condición de compatibilidad temporal de la curva de acumulación de daño

En esta ROM 1.1-18, con carácter general, se determina el nivel de daño a partir de la acumulación de avería en la sección contabilizada a partir de un determinado estado, p. ej. entrada en servicio de la obra, después de una reparación, etc. La función matemática que modela la acumulación del daño se especifica en términos adimensionales (variables dependientes), y debe satisfacer la condición de compatibilidad: si D es el daño producido por una sollicitación de duración $t = t_1 + t_2$, d_1 el producido en el intervalo de tiempo t_1 , y d_2 el producido en el intervalo de tiempo t_2 , entonces $D = d_1 + d_2$. Matemáticamente, el daño acumulado se puede expresar como,

$$d(d_0, N_s, t) = q [q^{-1}(d_0, N_s) + t, N_s] \quad (2.1)$$

donde, N_s es el número de estabilidad o valor del agente adimensional, d_0 el daño inicial (Castillo et al., 2012) y t el tiempo transcurrido desde el instante inicial.

Cuando las duraciones de los estados meteorológicos no son iguales, se puede transformar la duración de cada uno de ellos en otras equivalentes (con la misma evolución del daño) teniendo en cuenta la magnitud de los agentes y el modelo de acumulación $q(t, H)$.

COMENTARIO

Un caso particular, que permite describir la evolución en sistemas que no alcanzan escalones de equilibrio, es el modelo de acumulación del daño de tipo potencial de la forma

$$d(d_0, N_s, t) = \left[d_0^{1/b} + (a N_s^c)^{1/b} t \right]^b \quad (2.2)$$

Este modelo consta de tres parámetros; a y c , cuantifican el incremento del daño asociado a una magnitud del agente H ; b expresa la potencia que caracteriza cómo se acumula el daño. Esta función forma parte de la familia de modelos de escala, más general, dada por la expresión:

$$d(d_0, N_s, t) = q [q^{-1}(d_0) + \alpha(N_s) t] \quad (2.3)$$

donde α es una función del agente adimensional N_s .

2.4.3 Trayectoria del daño acumulado en un ciclo de sollicitación

Un ciclo de sollicitación define la evolución temporal de los descriptores de estado de los agentes climáticos que exceden de forma continua un valor umbrales preestablecido. Su apariencia es la de un histograma *tiempo-agente* donde la anchura de cada barra es la duración del estado. Conocida la duración y con el periodo medio del estado (habitualmente el de paso por cero ascendente, o $m_{0,1}$, se calcula el número medio de olas en el estado. Bajo el supuesto de que las formas de la avería son geoméricamente similares, es decir que la geometría adimensional de la avería es independiente del estado en el que ha ocurrido, las curvas de iso-valor característico *duración-daño* con parámetro el valor del agente, permiten determinar la trayectoria de la avería acumulada en función de los histogramas del ciclo.

A la hora de calcular la trayectoria temporal de la avería se debe tener presente que la acción del oleaje, depende, además, del periodo característico, el ángulo de incidencia del oleaje y del nivel del mar en el estado meteorológico. Cuando las variaciones del nivel de mar sean significativas en comparación con las dimensiones características de la sección, es conveniente trabajar por escalones del nivel del mar, teniendo en cuenta el condicionante geométrico derivado de los restantes escalones.

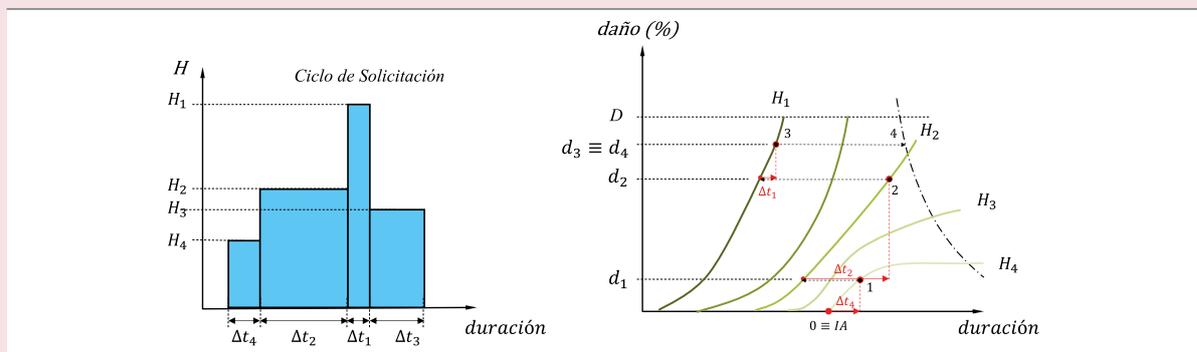
La evolución de la avería de un dique es un proceso multivariado que se debe tener en cuenta en su determinación teórica o experimental. Dependiendo de la importancia de la obra este cálculo admite diversas simplificaciones.

COMENTARIO

ESQUEMA DEL PROCESO DE ACUMULACIÓN DE DAÑO EN EL CICLO DE SOLICITACIÓN

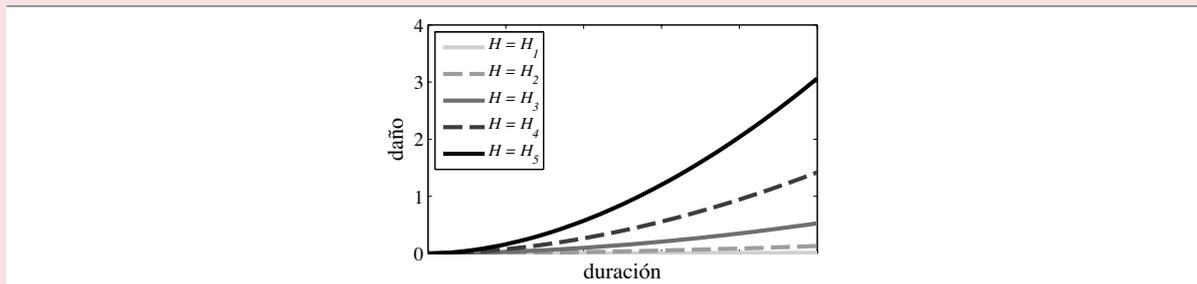
En la figura 2.11 se muestra la acumulación del daño durante un ciclo de solicitación discretizado en cuatro estados meteorológicos de distinta duración. El primer estado corresponde a un valor característico del agente predominante H_4 que tiene asociado un número de estabilidad $N_{s,4}$ y una duración Δt_4 . El daño acumulado se obtiene entrando con esta duración y el punto de inicio de avería 0 en la curva $H_4 \rightarrow N_{s,4}$. El nivel de avería alcanzado (punto 1) es el daño inicial del que se parte en el siguiente estado (curva $H_2 \rightarrow N_{s,2}$ y duración Δt_2). El procedimiento se repite en este estado y en el siguiente. Finalmente, el último estado de valor $H_3 \rightarrow N_{s,3}$ no es capaz de incrementar el daño acumulado, independientemente de la duración del mismo.

Figura 2.11: Ejemplo de acumulación del daño en un ciclo de solicitación. Trayectoria del daño (vectores en rojo) en función de la altura de ola característica del estado y su duración correspondientes al ciclo de solicitación representado por un histograma. No incluye la dependencia del periodo característico



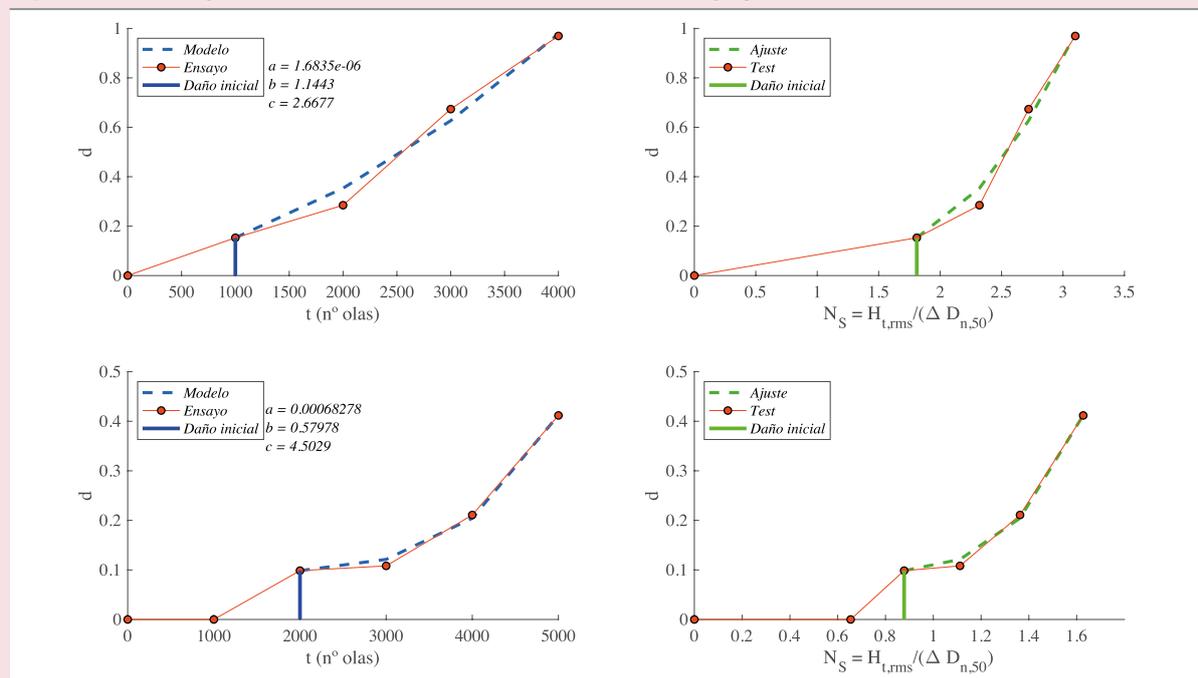
Las curvas anteriores se pueden ajustar a partir de un ensayo de laboratorio, tal como se muestra a continuación. El ensayo consta de ocho escalones de altura de ola incidente creciente y período constante, donde cada escalón tiene una duración de 1000 olas. La acumulación del daño por extracción de piezas del manto en un dique en talud se cuantifica por el área erosionada en cada escalón del ensayo. El ajuste de la función de tipo potencial, ecuación 2.2, a los datos experimentales realizados en el Canal Ola-Corriente del Grupo de investigación de Dinámica de Flujos Ambientales (GDFA-UGR), se representa en la figura 2.12.

Figura 2.12: Curvas de iso-valor del modelo de ajuste para distintos valores de H y $d_0 = 0$



En la figura 2.13 se ajusta una función potencial (ecuación 2.2) a los valores experimentales del daño acumulado en función del número de olas en el estado (figura izquierda) y en función del Número de Estabilidad (figura derecha). Los valores de los coeficientes del ajuste se incluyen en el lado izquierdo. En el panel superior (a) se recogen los resultados de los datos (período $T = 2.5$ s) de Van der Meer, 1988, para un dique homogéneo de escollera ($D = 36$ mm). En el panel inferior (b), se muestran los resultados de los datos experimentales (período $T = 2$ s) para un dique en talud ($D = 26$ mm) con espaldón, realizados y analizados por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada.

Figura 2.13: Ensayos de evolución del daño acumulado medido y ajuste



2.4.4 Dependencia temporal del modelo de probabilidad del daño acumulado

La función de densidad de probabilidad (fdp) de la variable aleatoria daño acumulado depende de la fdp del daño inicial y de la secuencia de estados. Conocidas ambas, se pueden calcular las funciones de densidad y de distribución del daño de acuerdo con lo siguiente.

Aleatoriedad del daño inicial

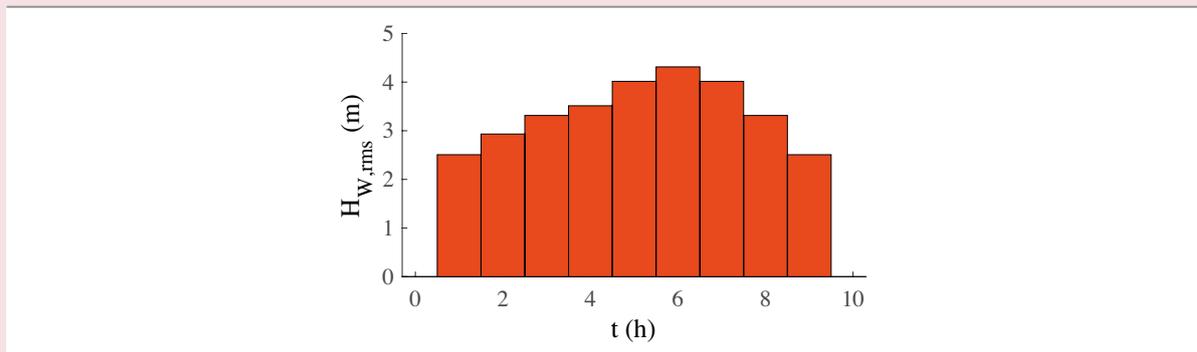
Si la distribución del daño inicial se define por f_{d_0} , y la expresión paramétrica que describe la acumulación del daño d se expresa por $q(t, N_s)$, para una secuencia de estados definida por $H_s(t)$ o $N_s(t)$, la fdp del daño acumulado al cabo de un tiempo t , ecuación 2.4, es

$$f_d(d, t, N_s) = \frac{q' [q^{-1}(d, N_s) - t, N_s]}{q' [q^{-1}(d, N_s)]} f_{d_0} \{q [q^{-1}(d, N_s) - t, N_s]\} \quad (2.4)$$

COMENTARIO

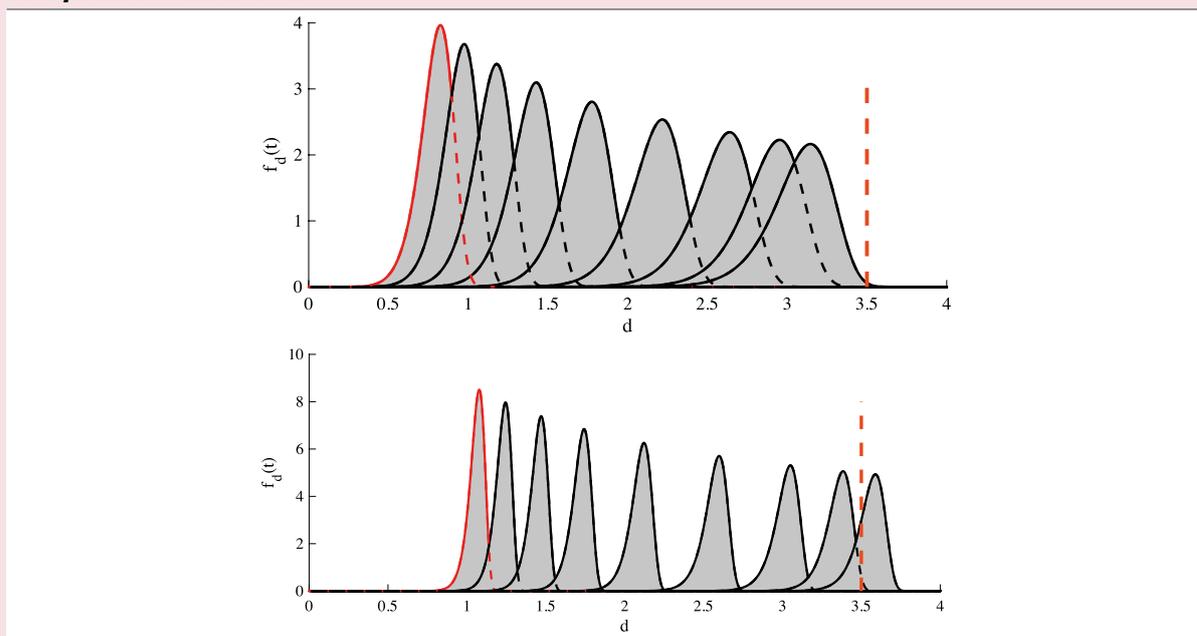
EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA PROBABILIDAD DE FALLO ACUMULADO

En el siguiente ejemplo se analiza la evolución de la avería a lo largo del ciclo de sollicitación de la figura 2.14, en función de la altura de ola media cuadrática $H_{W,rms}$, suponiendo que el dique se debe reparar cuando se inicia la avería (con un valor d_0) pero aún no se ha comenzado a ejecutar los trabajos. En concreto, se analiza la evolución temporal de la fdp del daño acumulado con dos estrategias de control: (a) el inicio de la reparación se decreta para valores bajos de la avería, pero no se hace un control exhaustivo del daño y (b) el inicio de la reparación se decreta para valores de daño más elevados, pero el control de la avería es mucho más intenso.

Figura 2.14: Secuencia de estados del ciclo característico analizado

Al comienzo del ciclo se define el daño inicial para el cual se debe reparar. Se especifica mediante dos funciones de probabilidad de Weibull; en el caso (a), la pdf tiene media μ_a y desviación típica σ_a , mientras que en el otro, caso (b), la media $\mu_b = 4/3\mu_a$ y la desviación típica $\sigma_b = \sigma_a/2$. Además, se define el valor del daño d_c el cual es crítico y que demandaría la restauración de la sección para recuperar los requisitos de proyecto. Así se está definiendo dos estrategias frente a la reparación. En ambas el daño crítico es el mismo, pero el daño que se elige para decidir la reparación son diferentes: (a) estrategia prudente para un nivel de daño inicial y (b) estrategia atrevida para un nivel de daño más avanzado.

Los resultados para ambas estrategias se muestran en la figura 2.15, modelo de acumulación del daño del ejemplo anterior (figura 2.13). En ella se representa la función de densidad del daño de partida (línea roja) y la del daño acumulado en cada uno de los estados que componen el ciclo de sollicitación. Se indica, además, mediante una línea discontinua el nivel crítico de daño, $d_c = 3.5$. El área bajo la fdp en el intervalo d_c , destrucción proporciona la probabilidad de fallo, p_{f,d_c} de la sección al final del ciclo de sollicitación si no se acomete la reparación. Para la estrategia (a), el área bajo la curva es muy pequeña (despreciable), mientras que para la estrategia (b) el área de la curva es importante e incluye el valor modal del daño. La fiabilidad de la estructura si no se repara a la presentación del ciclo de sollicitación es $r = 1 - p$.

Figura 2.15: Evolución temporal de la probabilidad del daño acumulado considerando para dos pdf del daño inicial, representativas de una estrategia de reparación prudente frente a una estrategia de reparación más atrevida

Aleatoriedad de la secuencia de estados en un ciclo de solicitud

La estimación de las funciones de probabilidad del daño acumulado se puede apoyar, con carácter muy general, en el teorema del límite central, según el cual la suma de los daños de un número suficientemente alto de estados tenderá a distribuirse según una campana de Gauss, independientemente de la función de probabilidad del daño en un estado individual.

Para un modelo de acumulación del daño de tipo potencial,

$$d(d_0, N_s, t) = \left\{ (d_0 - \gamma)^{1/b} + \int_0^t \alpha [N_s(t)] dt \right\}^b,$$

donde γ y b son constantes y $N_s(t)$ es la secuencia de estados que origina el daño. Bajo estos supuestos, la evolución temporal de la función de distribución $F_d(d, t)$ del daño acumulado en un ciclo de solicitud es,

$$F_d(d, t) = \Phi \left[\frac{(d - \gamma)^{1/b} - \mu_0 - kt}{\sqrt{\sigma_0^2 + rt}} \right], \quad (2.5)$$

donde $\Phi(d)$ es la función de distribución normal estándar, μ_0 y σ_0^2 son la media y la varianza de $(d_0 - \gamma)^{1/b}$, y kt y rt son la media y la varianza de $\int_0^t \alpha [N_s(t)] dt$.

COMENTARIO

SECUENCIA PARA ESTIMAR LOS PARÁMETROS DEL MODELO DE EVOLUCIÓN DE DAÑO

En [Castillo et al. \(2012\)](#) se puede encontrar la siguiente secuencia de trabajo para estimar los parámetros del modelo anterior: μ_0 y σ_0^2 (daño inicial), γ y b (características del dique) y k y r (características de la respuesta a los agentes),

1. Estimar la media y desviación típica del daño inicial (por ejemplo, mediante ensayos o experiencia previa).
2. Estimar los parámetros γ y b del modelo de acumulación del daño mediante ensayos de laboratorio.
3. Definir la función de acumulación del daño αN_s^c mediante ensayos de laboratorio y ajustar sus parámetros adoptando, en su caso, criterios prudentes (nivel de confianza) para que el resultado esté del lado de la seguridad.
4. Estimar los parámetros k y r a partir de información histórica disponible y los modelos ajustados en los pasos anteriores:

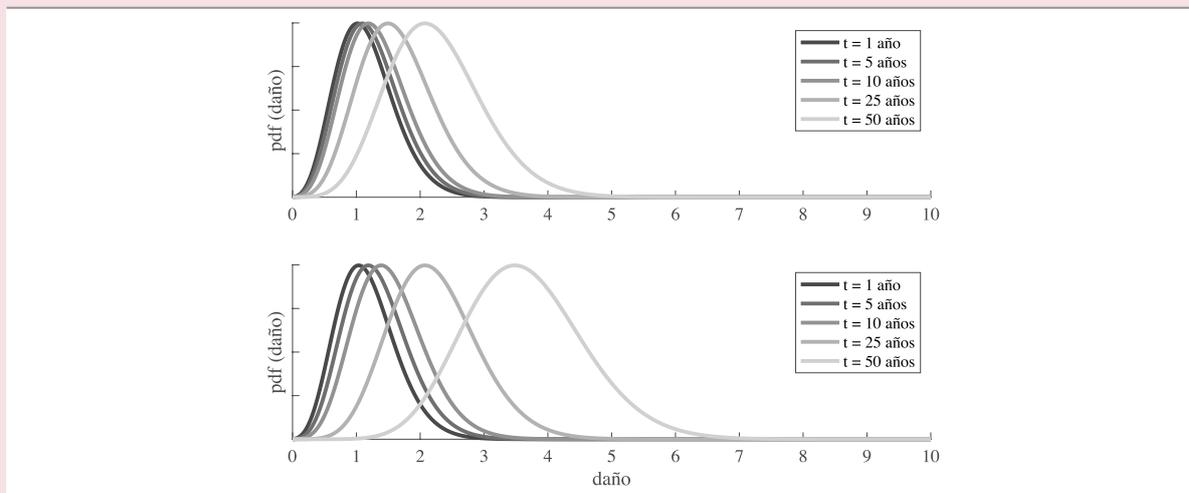
$$k \approx \frac{\int_0^t \alpha [N_s(t)] dt}{t}$$

$$r \approx \frac{\sum_{i=0}^t \left\{ \int_i^{i+1} \alpha [N_s(t)] dt - k \right\}^2}{t}$$

5. Aplicar la ecuación 2.5 para estimar la variación temporal de la fiabilidad y la probabilidad de fallo.

En la figura 2.16 se muestran las funciones de densidad del daño acumulado en función del tiempo, correspondientes al modelo de la ecuación 2.5 para los parámetros $b = 1.8$, $\gamma = 0$, $\mu_0 = 1$ y $\sigma_0 = 0.25$, para una misma función de acumulación del daño pero distintas características del clima marítimo. El panel superior corresponde a $k = 0.01$ años⁻¹ y $r = 5 \cdot 10^{-4}$ años⁻² y el inferior a $k = 0.02$ años⁻¹ y $r = 10^{-3}$ años⁻².

Figura 2.16: Evolución temporal de la probabilidad del daño acumulado considerando la variabilidad de los agentes



2.4.5 Progreso temporal de otras variables acumulativas

Si el agente predominante es el oleaje, los modos principales de fallo de un dique de abrigo suelen pertenecer al subsistema perímetro exterior (que se describe en la Sección 3). Su ocurrencia se manifiesta bien por bien cambios geométricos de la sección, bien número de piezas desplazadas, bien movimientos como sólido rígido, etc. Su importancia se describe por niveles crecientes acumulativos de nivel de la avería, comenzando por un nivel de inicio hasta la destrucción. Esta secuencia discreta especifica el progreso temporal del modo de fallo. Para cada uno de los modos de fallo del perímetro exterior, barlomar y sotamar, que envuelve el cuerpo central (manto principal y bermas) y el espaldón o la superestructura de la sección. Es habitual describir la evolución temporal del daño acumulado mediante las siguientes variables (métrica de la avería),

- manto principal y bermas: forma de la geometría y/o número acumulado de elementos desplazados
- espaldón y superestructura: desplazamientos y/o giros como sólido rígido con respecto a su posición inicial
- rebase: número de episodios y volumen acumulado de agua ola a ola, o en el estado.

COMENTARIO

La conceptualización del análisis del dique en su comportamiento como un conjunto, en el diseño del subsistema perímetro exterior, puede verse en [Vilchez et al., 2017](#) y [Molines et al., 2018](#).

En estas condiciones, la función que describe la evolución temporal de la avería, $A(A_0, Q, t)$ debe satisfacer la condición de compatibilidad. Con amplia generalidad su expresión matemática es,

$$A(A_0, Q, t) = q [q^{-1}(A_0, Q) + t, Q] \quad (2.6)$$

donde Q es el valor adimensional del agente y A_0 es el valor inicial de la avería ([Castillo et al., 2012](#)).

Este modelo acumulativo se puede aplicar a diferentes escalas temporales, entre otras,

- escala de estado: una secuencia aleatoria de olas de altura, periodo y dirección y duración,
- escala ciclo de sollicitación: secuencia aleatoria de estados altura, periodo, dirección y duración
- escala año (o estación), secuencia aleatoria de ciclos de sollicitación de forma y duración aleatoria.

Evolución temporal de la avería con sentido alternante del proceso

Algunos de los procesos que afectan la estabilidad de los diques en talud tienen ciclos acumulativos o de recuperación de la geometría original del proyecto que alternan con los ciclos erosivos, con desplazamiento de elementos y cambio geométrico de la sección. El modelo matemático-estadístico de la evolución del daño es aplicable, por ejemplo, tanto a la erosión como a la acumulación de sedimentos tales como la evolución temporal de la socavación y la formación de barras en el pie y frente del dique, o la propagación y acumulación de sedimentos en el núcleo. La expresión matemática de la ecuación (2.6) se puede aplicar tanto al proceso erosivo como al acumulativo, al menos mientras que se mantenga el sentido del proceso.

Para aplicar el modelo cuando el proceso es alternante, acumulativo-erosivo, es necesario compatibilizar las funciones que evalúan el proceso acumulativo con el erosivo teniendo en cuenta el estado morfológico o geometría de la infraestructura. Hay poca información disponible para desarrollar la compatibilidad de las funciones por lo que, en estos casos, es conveniente realizar ensayos específicos a la escala adecuada para desarrollar una expresión matemática acorde con el proceso analizado. La selección de la escala es crucial para que los resultados experimentales sean representativos y aplicables a la escala de prototipo.

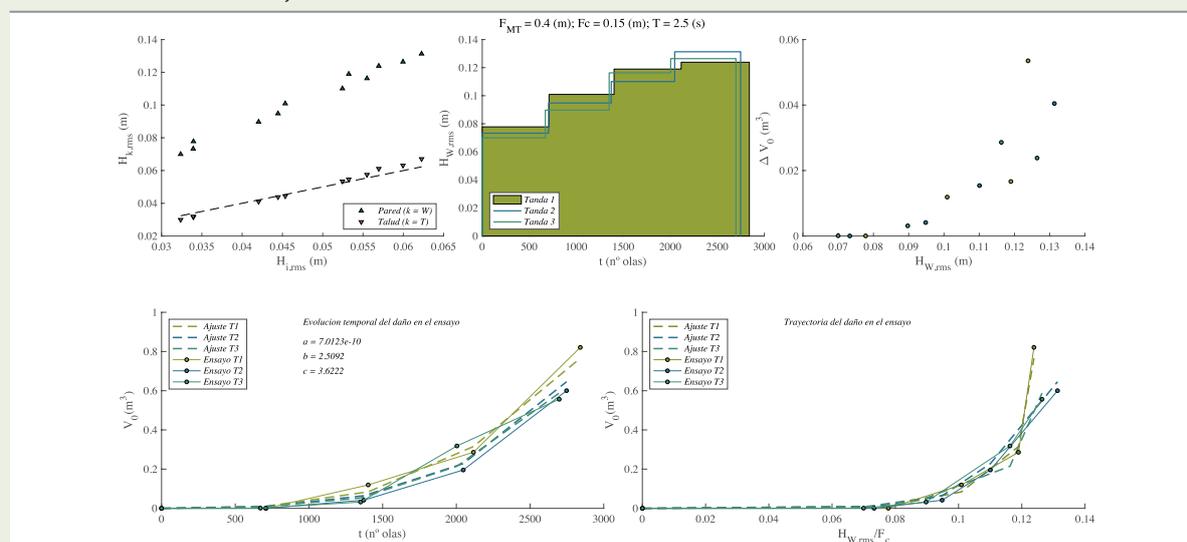
EJEMPLO

MODELO ACUMULATIVO DEL VOLUMEN DE REBASE EN UN CICLO DE SOLICITACIÓN

El volumen de rebase acumulado en un estado (figura 2.17), el número total de olas que rebasan en un ciclo de solicitación o el número de episodios de rebase en la vida útil de la infraestructura son variables susceptibles de ser modeladas con la función de acumulación, siempre que se cumplan las condiciones de compatibilidad requeridas para su aplicación. En la figura 2.17 se presentan los resultados de los ensayos del volumen de rebase acumulado sobre un dique mixto para cuatro secuencias de estados de oleaje de altura significativa creciente y periodo constante y 800 olas cada uno de ellos. El ensayo se repitió tres veces (tandas 1, 2 y 3). Los ensayos se realizaron en el Canal Ola-Corriente del Grupo de Investigación de Dinámica de Flujos Ambientales (G DFA-UGR).

A partir de estos resultados se pueden definir diferentes magnitudes relacionadas con el rebase, (a) tasa de variación del volumen de rebase con el francobordo relativo, (b) volumen medio de rebase por estado, (c) caudal medio de rebase por las olas que rebasan, etc., que son relevantes para dimensionar el dique y acotar las consecuencias del rebase en su seguridad y operatividad.

Figura 2.17: Ensayos de acumulación de volumen rebasado. Volumen de agua acumulado en tres tandas de cuatro secuencias de ciclos de olas de igual duración y período, y altura incidente significativa creciente ($H_{i,rms}$). Los resultados del modelo de acumulación se muestran frente al valor medio cuadrático de la altura de ola en el espaldón ($H_{W,rms}$)



Progreso temporal de los costes de proyecto

En la Sección 5 de este Articulado, Artículos 5.3.1 y 5.3.2, se estructuran los costes de inversión y de operación del Proyecto de Inversión que sean imputables al dique en, (a) costes de construcción, (b) coste de reparación, (c) costes de desmantelamiento, (d) costes de conservación y (e) costes por pérdida de operatividad durante la fase de explotación. El coste total a lo largo del ciclo vital, (progreso temporal), del dique es una variable aleatoria acumulativa, al igual cada uno de los costes que lo componen.

En el Artículo 5.3.3, (ver Artículo 5.3.1), se recomienda aplicar el método descrito para estimar los modelos de probabilidad del coste total en el ciclo vital del dique. De forma análoga al daño acumulado, se pueden definir otros descriptores estadísticos del coste que describen su comportamiento en otras escalas temporales, por ejemplo coste medio anual u otras magnitudes relacionadas con el análisis económico-financiero del dique de abrigo.

2.4.6 Niveles de parada operativa y evolución temporal de la parada operativa

La operatividad del área portuaria es uno de los objetivos del análisis económico-financiero de la infraestructura. El diseño del área, su disposición en planta y la fiabilidad y operatividad de la infraestructura dependerán de él.

De acuerdo con la ROM 0.0-01 cada uno de los tramos del dique de abrigo deben de satisfacer los requisitos de proyecto frente a la operatividad. Es conveniente distinguir dos maneras de analizar la parada operativa relacionada con el comportamiento del dique de abrigo,

- (a) Cuando el valor del agente, (altura de ola, velocidad de viento, etc.), excede un valor umbral en el tramo o en otra infraestructura del área portuaria y el tramo deja de estar operativo sin fallos estructurales o formales del mismo. El nivel de plena operatividad se recupera una vez que el valor del agente decrece por debajo del valor umbral.
- (b) Cuando se producen fallos estructurales en el tramo o en el dique. Las condiciones de plena operatividad no se recuperan mientras que no se repare la avería o se reconstruya el tramo.

En ambas situaciones el nivel de incumplimiento se puede especificar por, al menos, tres niveles, umbrales, de operatividad.

- (a) plena operatividad,
- (b) operatividad restringida, y
- (c) parada operativa completa con cierre, o no, del acceso al puerto.

Duración de una parada operativa

La pérdida de operatividad del tramo o dique frente a la operatividad sin fallo estructural se puede representar por funciones escalón, recta de pendiente fuerte, tangente hiperbólica y función potencial en función del valor umbral del agente. Es habitual asociar la duración de la pérdida de operatividad a la duración de la excedencia del valor umbral del agente.

La duración de la pérdida de operatividad causada por fallos estructurales del tramo o dique depende, entre otros, del tiempo y los medios de respuesta para intervenir y de la duración de los trabajos de reparación. Para su determinación es necesario definir un valor umbral específico bajo esas condiciones para los diferentes valores de los agentes que condicionan la operatividad.

En el intervalo de tiempo que transcurre entre el fallo estructural y la recuperación del nivel de plena operatividad, la duración es una variable acumulativa. El progreso temporal y los fdp de la duración acumulada se modelan de forma análoga a la variable acumulada del daño. A partir de ellos, se pueden definir otras variables de estado (estadísticas) relacionadas con la pérdida de operatividad. Son útiles para el análisis de sensibilidad (ver Artículo 5.4.3) de cara a reducir la recurrencia y duración del modo de parada y minimizar sus repercusiones económicas.

Operatividad en condiciones de trabajo excepcionales

En la ROM 0.0-01, apartados 4.5 y 4.6, se analiza la operatividad durante y después de las condiciones de trabajo excepcionales CT_3 , en particular se identifican las siguientes condiciones de trabajo,

- ◆ $CT_{3,1}$, excepcionales fortuitas,
- ◆ $CT_{3,1,1}$, fortuitas del medio físico,
- ◆ $CT_{3,1,2}$, fortuitas accidentales
- ◆ $CT_{3,2}$, excepcionales previstas

En todos los casos, el proyecto debe analizar y, en su caso, especificar los niveles de operatividad requeridas durante las condiciones de trabajo post-excepcionales, $CT_{1,3}$. Análogamente, cuando las condiciones de trabajo excepcionales están previstas, los niveles de operatividad deben especificarse en los proyectos de Inversión y Construcción y ser congruentes con el Plan Director de la Infraestructura.

2.5 PROBABILIDAD DE FALLO A UN NIVEL DE AVERÍA AVANZADO

En esta ROM 1.1-18 se propone vincular el nivel de destrucción con la probabilidad de fallo adjudicada en el reparto de la probabilidad conjunta entre los modos principales del tramo. El cálculo de la probabilidad conjunta y su reparto entre modos de fallo principales se recoge en el apartado 7.5 de la ROM 0.0-01 y en los apartados 2.5.3 y 2.5.4 de la ROM 1.0-09.

Si para un modo de fallo genérico se denota por,

- ◆ D_0 , el nivel de inicio de avería,
- ◆ D_f , el nivel de avería para el que se declara la destrucción,
- ◆ $Pr [D_0, V]$, la probabilidad de que se alcance el inicio de avería en un intervalo de tiempo V (por ejemplo, la vida útil), y
- ◆ $Pr [D_f | D_0, V]$, la probabilidad de que en el tiempo V se alcance el nivel de avería D_f , condicionada a que la avería haya alcanzado el nivel D_0 ,

la probabilidad de fallo del modo en el tiempo V , $P_{f,V}$, es,

$$P_{f,V} = Pr [D_0, V] \cdot Pr [D_f | D_0, V] \quad (2.7)$$

donde el segundo factor es una probabilidad condicionada y su valor depende de, (1) la concepción de la obra (expresada por los árboles de desencadenamiento y propagación) y (2) de la estrategia de reparación que determinan los costes de construcción y de reparación, entre otros. La ecuación 2.7 ayuda a cuantificar el reparto de la probabilidad conjunta de fallo (requisito de proyecto dependiente del ISA) para los diferentes diseños posibles del dique.

2.5.1 Concepciones para el diseño

El diseño del dique se embrida entre dos concepciones extremas,

- ◆ “Diseño ELU, a inicio de avería”, y
- ◆ “Diseño crítico, a reparación continua”.

Entre estas dos concepciones hay un amplio número de opciones, que en esta ROM 1.1-18 se engloban bajo la denominación común, “Diseño ELS, a nivel avanzado de avería”, que combinan las dimensiones del dique, las estrategias de reparación con los medios de construcción y reparación y el coste total del dique. Todas ellas deben satisfacer el requisito de no exceder la probabilidad conjunta de fallo de los modos principales frente a la seguridad en la vida útil del tramo.

Diseño ELU, a nivel de inicio de avería

Si se asume que,

$$Pr [D_f | D_0, V] = 1$$

el inicio de avería equivale a la destrucción, se considera que el modo de fallo está adscrito a un estado límite último (ELU), y para recuperar la finalidad del tramo es necesario acometer su reconstrucción. Este planteamiento, aplicado a los modos principales de fallo de los diferentes tramos del dique, determina el coste de la construcción, los costes probables de reconstrucción y la rentabilidad económica y financiera del capital. El ámbito de la decisión técnica-económica se concreta en prescribir cuando se inicia el fallo y cómo reconstruir la sección.

En el caso de desplazamiento de piezas de un manto, posiblemente a partir de ensayos en laboratorio, es habitual considerar un número mínimo, (o tanto por ciento), de piezas desplazadas de su posición inicial para determinar el nivel de inicio de avería, y en consecuencia, el de destrucción y la necesidad, en teoría, de la reparación o reconstrucción del tramo.

Diseño crítico, a reparación continua

Si se admite que,

$$Pr [D_0, V] = 1$$

$$P_{f,v} = Pr [D_f, V] < 1$$

el dique se dimensiona considerando que es necesario reparar continuamente el dique en su vida útil para evitar que se produzca su destrucción y cumpla los objetivos de su construcción.

En el caso de un dique de escollera diseñado con peso mucho menor que el correspondiente a inicio de avería, el talud del manto principal del dique se iría perfilando en forma de S y perdiendo material a lo largo del tiempo. Para evitar la apertura de una brecha y el paso del oleaje al interior del área portuaria y la destrucción del dique sería necesario suministrar continuamente escollera. El ámbito de la decisión técnica-económica se concreta en prescribir cómo se ejecuta el suministro continuo de escollera en los diferentes tramos del dique.

Diseño ELS, a nivel avanzado de avería

Si se diseña de modo que,

$$Pr [D_0, V] < 1; Pr [D_f | D_0, V] < 1;$$

con la condición,

$$P_{f,v} < Pr [D_0, V] \cdot Pr [D_f | D_0, V] \tag{2.8}$$

el ámbito de decisión en el diseño se amplía significativamente. Para dimensionar el tramo se debe, (1) prescribir cuando se inicia el fallo y seleccionar su probabilidad, $Pr [D_0, V]$ y (2) especificar la estrategia de reparación para evitar la destrucción y seleccionar su probabilidad $Pr [D_f | D_0, V]$.

A medida que se reduce la probabilidad de inicio de avería, debe crecer la probabilidad condicionada de alcanzar el nivel de destrucción. La decisión de una modalidad de diseño y el reparto de la probabilidad entre los dos factores de la ecuación 2.8, debe estar basada (ámbito de la decisión) en criterios técnicos, económico-financieros, sociales, legales y ambientales, debidamente apoyados en la optimización técnico-económica (ROM) del Proyecto de Construcción y en la optimización económico-financiera del Proyecto de Inversión, de acuerdo con lo indicado en la Sección 5.

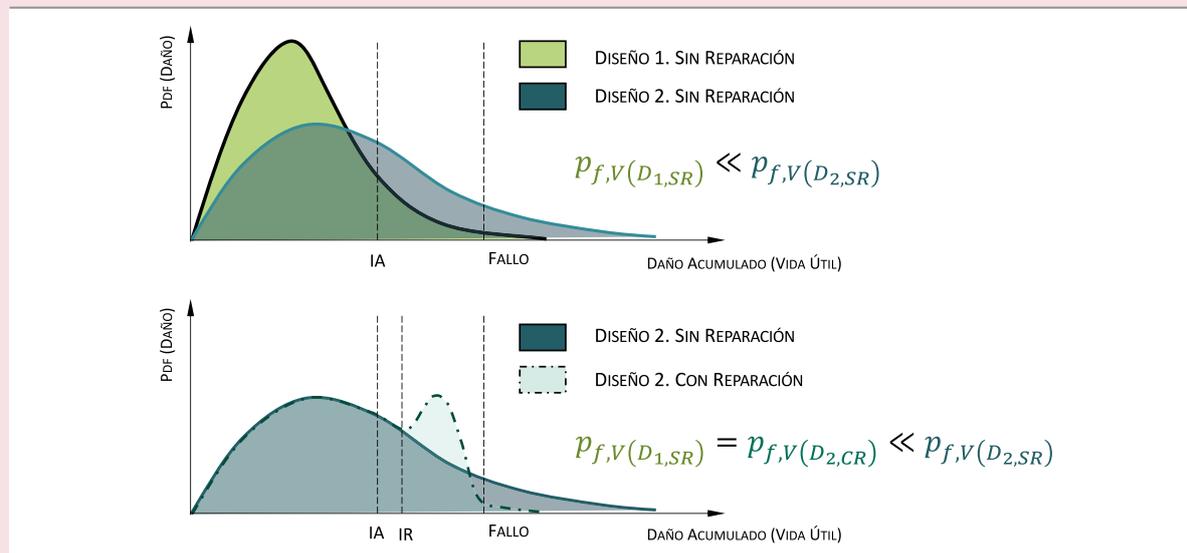
COMENTARIO

En el ejemplo de la figura 2.18 se muestra las funciones de densidad de probabilidad (fdp) de la avería acumulada en la vida útil correspondientes a un determinado modo de fallo cuya probabilidad de fallo máxima admisible no debe exceder 0.05.

La gráfica superior corresponde al diseño de una sección de dique con dos valores de la fiabilidad, sin considerar la reparación si la estructura falla. En el primer supuesto (identificado por $D_{1,SR}$), la probabilidad de inicio de avería (IA) es 0.25 y la probabilidad de que dicha avería progrese hasta el fallo (F_{fallo}) es 0.2. En el segundo supuesto (identificado por $D_{2,SR}$), la probabilidad de inicio de avería es 0.4 y la probabilidad de que la avería progrese hasta el fallo es 0.5. Ambas probabilidades son significativamente mayores que las correspondientes del primer supuesto. En consecuencia, (1) los costes de primera construcción del dique diseñado con el segundo supuesto son menores a los del primer supuesto, (2) su resiliencia también es significativamente menor y (3) su probabilidad de fallo en la vida útil (área bajo la correspondiente curva fdp en el intervalo *daño acumulado* $> F_{fallo}$) también es significativamente mayor.

En la gráfica inferior se representan las funciones de densidad de la avería acumulada correspondientes al segundo $p(IA) = 0.4$ y $p(F_{fallo}) = 0.5$, con y sin estrategia de reparación. La estrategia de reparación supone intervenir a partir del nivel de avería IR. En consecuencia, (1) el coste total de la obra se incrementa al incluir los costes de reparación correspondientes a cada estrategia de reparación, y (2) en este caso la probabilidad de que la avería en la vida útil progrese hasta el fallo decrece hasta 0.125. De este modo se cumple el requisito de partida de una probabilidad de fallo máxima admisible en la vida útil de 0.05.

Figura 2.18: Funciones de densidad de probabilidad (pdf) del daño acumulado en la vida útil, para dos diseños 1 y 2, con y sin reparación, en este caso, a su vez, con la estrategia de reparar cuando el nivel de avería es IR. IA e IR indican el inicio de avería y el de reparación, respectivamente. F_{fallo} indica máximo fallo admisible. La probabilidad de fallo en la vida útil es el área bajo la correspondiente pdf en el dominio $Daño > F_{fallo}$. Al incluir la reparación, la forma de la pdf del daño acumulado en la vida útil es diferente en el intervalo $Daño > (IR)$



Este ejemplo evidencia la relevancia del Estudio de Alternativas y de Soluciones para seleccionar las más adecuadas entre las posibles que cumplen los requisitos de proyecto frente a la seguridad según la ROM 0.0-01. Por otra parte, la selección debe considerar los requisitos de operatividad, los costes totales, la distribución temporal de los costes a lo largo de la vida útil y de otros condicionantes técnicos, ambientales y sociales del proyecto.

2.5.2 Indicadores de la evolución temporal de la fiabilidad

Para correlacionar la estrategia de reparación con el modelo de acumulación temporal del fallo, resulta conveniente cuantificar la evolución temporal de los requisitos de proyecto frente a la seguridad y a la operatividad en la vida útil (o en otra fase de proyecto). Entre otras, se propone utilizar las siguientes: función de fiabilidad, la vida fiable, la función peligro y la tasa de disponibilidad de un componente.

Variación de la probabilidad de fallo con el tiempo

La función de fiabilidad $R(t)$ describe la probabilidad de que un componente se comporte adecuadamente (en general, que no falle) durante un determinado período de tiempo t_V (medido desde un instante inicial, que puede ser el inicio de las operaciones, el inicio de la avería D_0 , u otros). Esta función se puede expresar por medio de la ecuación 2.9

$$R(t) = \int_t^{\infty} f_W(t) dt = 1 - F_W(t) \quad (2.9)$$

donde W es la variable aleatoria tiempo de supervivencia, $f_W(t)$ su función de densidad, $F_W(t)$ su función de distribución y t el intervalo de tiempo considerado. Esta variable, W , describe el intervalo que transcurre desde un instante de referencia t_0 (por ejemplo, cuando la obra o sus componentes entran en servicio, cuando se inicia una avería, etc.) hasta que se alcanza un determinado nivel de avería (por ejemplo el que marca el fallo o la destrucción).

Para procesos estacionarios, la función $R(t)$ de un modo puede expresarse en términos de la variable aleatoria que describe el intervalo entre fallos, U , por medio de la expresión 2.10, y el "riesgo de fallo", o la probabilidad de que haya al menos un fallo en el intervalo de tiempo $t < t_V$, por su valor complementario $P_f(t)$,

$$R(t) = 1 - \lambda_U \cdot t + \lambda_U \int_0^t F_U(w) dw \quad (2.10)$$

donde F_U es la función de distribución del tiempo entre fallos, $\lambda_U = 1/\mu_U$ es la tasa media de fallos por unidad de tiempo y μ_U caracteriza al valor medio de U . Los valores superiores e inferiores que acotan el rango de aplicación de este modelo son, $R(t) \geq 1 - \lambda_U \cdot t$ y $P_f(t) \leq \lambda_U \cdot t$, para $t \leq 1/\lambda_U$.

Vida fiable, t_r

Es el tiempo que transcurre para que la fiabilidad, de inicio, de destrucción u otro nivel de daño acumulado, decrezca hasta un nivel dado, r .

Función peligro, $h(t)$

Describe la tasa de fallos del sistema de tal manera que valores bajos se relacionan con tiempos esperados hasta el fallo grandes, y viceversa. Puede expresarse en términos de $R(t)$ por medio de la ecuación 2.11.

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{f_W(t)}{R(t)} \quad (2.11)$$

Tasa de disponibilidad de un componente, T_D

Cuantifica el tiempo durante el cual se encuentra un componente en buen estado en un intervalo de tiempo considerado, p. ej. vida útil. En el caso más simple, cuando el comportamiento del componente se puede asumir como estacionario, la tasa de disponibilidad, T_D , se puede obtener mediante la expresión 2.12

$$T_D = \frac{\tau_F}{\tau_F + \tau_R} \quad (2.12)$$

donde τ_F es el tiempo medio entre fallos y τ_R es el tiempo medio para efectuar la reparación.

Estimación de las funciones e indicadores

Con carácter general, los indicadores y funciones $\lambda_U, \mu_U, f_U(t), f_w(t), P_f(t)$ y $R(t)$ pueden obtenerse mediante la simulación de Monte Carlo del comportamiento de los modos de fallo en la vida útil. Los resultados de la simulación dependen del diseño y la estrategia de reparación. En el estado actual del conocimiento, es conveniente verificar los modelos de acumulación con ensayos en modelo físico, (ver Artículo 2.4.4).

COMENTARIO

En el Estudio de Alternativas y de Soluciones, se puede acotar el diseño por medio de los planteamientos a, (a) inicio de avería, IA, D_0 , y (b) destrucción, D, D_f . Entre otras, es habitual considerar una de las dos hipótesis de trabajo siguientes,

- (a) el inicio de avería es fallo reversible cuya reparación recupera íntegramente los fines y objetivos de la obra,
- (b) la destrucción es un fallo irreversible; la recuperación de los requisitos de proyecto sólo se alcanza con la reconstrucción del tramo.

Si el diseño se plantea con otros niveles de avería se deberá, análogamente, especificar la reparación/reconstrucción a realizar y sus implicaciones en la recuperación de los requisitos de proyecto.

Cuando se trabaja con inicio de avería y destrucción, se pueden obtener expresiones analíticas aproximadas de las funciones e indicadores de la evolución temporal del fallo bajo las siguientes hipótesis:

- ◆ El proceso es estacionario.
- ◆ Las averías ocurren como procesos de Poisson, con una tasa promedio de fallo (habitualmente en años) de $\lambda_\alpha = 1/\mu_\alpha$, donde α se refiere a D_0 para inicio de avería y a D_f para destrucción.
- ◆ El tiempo de supervivencia y la fiabilidad temporal de cada modo de fallo se pueden aproximar a partir de la frecuencia con que los agentes predominantes (en general, el oleaje) superan ciertos valores umbrales.

Las tasas medias de avería λ_{D_0} y λ_{D_f} pueden obtenerse de los períodos de retorno de la distribución extrema del agente predominante que dan lugar a estos sucesos. La probabilidad de fallo y la fiabilidad temporal para las averías D_0 y D_f toman los valores $P_{f,\alpha}(t) = 1 - \exp(-\lambda_\alpha \cdot t)$ y $R_\alpha(t) = \exp(-\lambda_\alpha \cdot t)$, cuya cotas son:

$$(a) \quad \text{si } t \leq 1/\lambda_\alpha \quad \begin{aligned} P_{f,\alpha}(t) &\leq \lambda_\alpha \cdot t \\ R_\alpha(t) &\geq 1 - \lambda_\alpha \cdot t \end{aligned}$$

$$(b) \quad \text{si } t > 1/\lambda_\alpha \quad \begin{aligned} P_{f,\alpha}(t) &\leq 1 \\ R_\alpha(t) &\geq 0 \end{aligned}$$

Además,

- (a) el tiempo medio de supervivencia sin que ocurra un inicio de avería desde el arranque de la obra o desde la última reparación es, $\mu_{W,D_0} = 1/\lambda_{D_0}$;
- (b) el tiempo medio de supervivencia sin que ocurra la destrucción desde el arranque de la obra o desde la última reconstrucción es, $\mu_{W,D_f} = 1/\lambda_{D_f}$;
- (c) (la función peligro es constante e igual a $h(t) = \lambda_{D_0}$ para diseño a inicio de avería y $h(t) = \lambda_{D_f}$ para diseño a destrucción; y
- (d) (la vida fiable para una fiabilidad mínima, r , es $t_r = -(1/\lambda_{D_0}) \cdot \ln(r)$ para inicio de la avería y $t_r = -(1/\lambda_{D_f}) \cdot \ln(r)$ para destrucción.

Índice de resiliencia potencial del diseño, IRP

El índice, IRP , cuantifica la posibilidad de que el nivel de avería de un modo principal progrese hasta la destrucción desde que se inicia la avería, en el supuesto de que su probabilidad de fallo es $P_{f,v}$, (adjudicada en el reparto de la probabilidad conjunta). Su valor se puede estimar aplicando la siguiente ecuación 2.13,

$$IRP = 1 - \frac{P_{f,v}}{Pr[D_0, V]} = 1 - Pr[D_f | D_0, V] \quad (2.13)$$

Este índice está definido en el intervalo $[0,1]$, correspondiendo los valores de $IRP = 0$ y $IRP = 1$, respectivamente, con las situaciones en las que, (a) $Pr[D_f | D_0, V] = 1$ (Diseño ELU) (el fallo supone la reconstrucción inmediata), y (b) $Pr[D_f | D_0, V] = 0$, situación hipotética en la que el nivel de destrucción en la vida útil es altamente improbable (probabilidad de ocurrencia igual o inferior a 10^{-4}).

En las situaciones intermedias, $[0 < IRP < 1]$, (Diseño ELS), es posible la reparación antes de que ocurra la destrucción, pero la probabilidad de que ésta ocurra no es nula, en todos los casos superior a 10^{-4} .

COMENTARIO

Bajo las hipótesis establecidas en el Comentario anterior, si se repara siempre que se produce el inicio de avería D_0 , la destrucción sólo ocurre con la frecuencia con la que el agente dominante (oleaje) produce el daño D_f , es decir,

$$Pr[D_f | D_0, V] = Pr[D_f, V],$$

y el índice de resiliencia potencial (IRP), (ecuación 2.13), puede expresarse en términos de la función de fiabilidad ($R(t)$) correspondiente a un diseño a inicio de avería y la correspondiente a un diseño a destrucción,

$$IRP = 1 - \frac{Pr[D_f, V]}{Pr[D_0, V]} = 1 - \frac{1 - \exp(-\lambda_f \cdot V)}{1 - \exp(-\lambda_0 \cdot V)} \approx 1 - \frac{\lambda_f}{\lambda_0} = 1 - \frac{\mu_0}{\mu_f} \quad (2.14)$$

En el caso de que $\mu_0 = \mu_f$ se obtiene $IRP = 0$, que corresponde a un modelo tipo ELU (reconstrucción), mientras que si $\mu_0 \ll \mu_f$ se obtiene $IRP \rightarrow 1$, que corresponde a un modelo tipo ELS apoyado en reparaciones frecuentes.

2.6 ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN ESPACIAL DE LA AVERÍA

Si una vez iniciada la avería de un modo de fallo principal de un subsistema no se repara, el progreso del daño podrá provocar el desencadenamiento de otros modos de fallo del subsistema, de otros subsistemas y de otros tramos. Este proceso se puede expresar por medio de conexiones entre componentes (elementos de un subsistema, subsistemas de un tramo o tramos del dique) que especifican los caminos de la pérdida de la fiabilidad estructural y de la operatividad si no se repara, hasta la destrucción, que conlleva a la declaración de la ruina del elemento jerárquico considerado. La aplicación de estrategias de reparación permite controlar el progreso del daño y el desencadenamiento de la avería en nuevos modos, restringiendo la probabilidad de fallo de la obra.

2.6.1 Árboles de desencadenamiento y propagación

Una manera de describir la evolución espacial de la avería es por medio de árboles de desencadenamiento y propagación del fallo. En el supuesto de iniciada la avería de uno o más componentes y de que no existe ninguna estrategia de reparación, el árbol describe gráficamente la evolución de los modos desencadenantes y la de los que se desencadenan a partir de ellos hasta la destrucción. La definición del fallo de cada componente debe ajustarse a la expresada en los diagramas de componentes, de acuerdo con la razón y ser de la estructura y sus partes.

Para la construcción de los árboles de desencadenamiento y propagación es preciso considerar, con carácter general, (1) las componentes que pueden iniciar su avería como consecuencia de la evolución de la avería/destrucción de otro u otros y (2) las combinaciones de componentes y sus respectivos niveles de daño que desencadenan el inicio de avería en aquellos. Además, es conveniente tener en consideración que, (a) distintos mecanismos pueden converger en un mismo fallo y (b) la avería de un mismo componente puede divergir en la propagación de distintos mecanismos de fallo en otros componentes.

COMENTARIO

En la figura 2.19 se representa la sección de un dique en talud cuyos modos de fallo principales son,

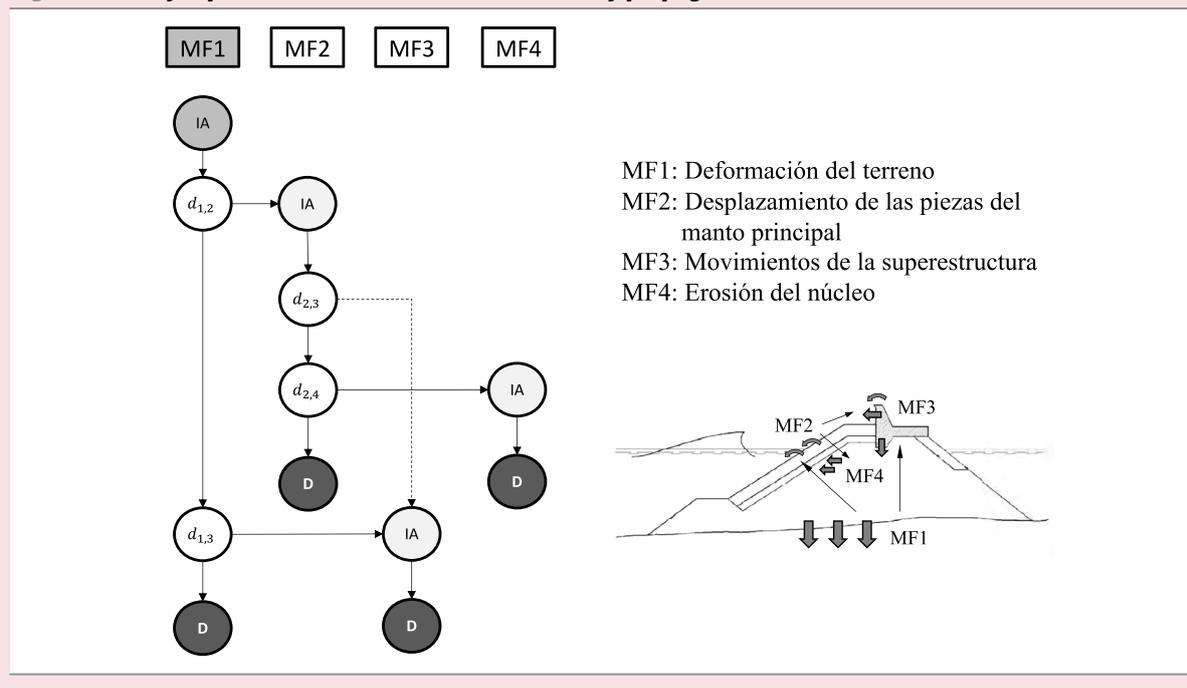
- deformación del terreno, (MF1),
- movimiento de piezas del manto principal, (MF2)
- movimiento de la superestructura, (MF3) y
- erosión del núcleo, (MF4).

Las averías no evolucionan de manera independiente sino que la progresión de unas conduce al inicio de otras, dando lugar a relaciones que se pueden expresar por medio de árboles de desencadenamiento y propagación.

La figura 2.19 incluye un árbol de desencadenamiento y propagación representación elaborado con los siguientes supuestos,

- se inicia la avería (IA) del modo, (MF1);
- cuando la deformación del terreno (MF1, subsistema cimentación) alcanza un nivel de daño $d_{1,2}$, se desencadena el desplazamiento de las piezas del manto principal, (MF2);
- cuando la deformación del terreno (MF1) alcanza el nivel de daño $d_{1,3}$, y/o cuando el desplazamiento de las piezas del manto principal (MF2) alcanza el nivel de daño $d_{2,3}$ se inicia el movimiento de la superestructura (MF3),
- si el desplazamiento de las piezas (MF2) alcanza el nivel de daño $d_{2,4}$, el núcleo (subsistema interior) queda al descubierto y se inicia el fallo (MF4).
- si no se repara, la progresión de cualquiera de estas averías alcanza el nivel de destrucción (D).

Figura 2.19: Ejemplo de árbol de desencadenamiento y propagación



2.6.2 Árbol para la toma de decisiones

El proyecto de un dique de abrigo depende de la modalidad de diseño y, en función del desencadenamiento y progreso de los diferentes modos de fallo principales, de las posibles estrategias de reparación que se adopten.

Para comparar el resultado de las distintas estrategias, (incluida la de no reparación), es conveniente su representación en forma de grafos o árbol de decisiones que, partiendo del inicio de avería en un componente y en un instante inicial t_0 , muestra los posibles caminos y los posibles desenlaces que este suceso puede ocasionar. El árbol y los posibles desenlaces dependen de la estrategia de reparación adoptada y de cómo se desencadena y propaga el fallo entre componentes a raíz del primero.

Para elaborar un árbol debe considerarse, (1) la descripción de las opciones y condicionantes de reparación y las consecuencias en caso de no hacerlo, (2) la probabilidad de destrucción antes de la finalización de la vida útil y (3) los costes de reparación y de reconstrucción. Además, debe caracterizarse el tiempo medio de supervivencia (u otro de sus estadísticos) contabilizado desde el inicio del fallo desde cualquier nodo intermedio del árbol hasta, p. ej. la destrucción, habitualmente bajo la condición de no reparación.

Es conveniente calcular el tiempo medio de supervivencia para estrategias de reparación contrapuestas. Previsiblemente, el valor menor esté asociado a la estrategia de no reparación de algunos o todos los componentes del dique; mientras que el valor mayor esté asociado a la estrategia de reparación inmediata (en el momento en que se inicia la avería) con una disponibilidad total de medios. El tiempo medio de supervivencia asociado a la estrategia óptima a adoptar, considerando los costes correspondientes a cada opción, estará en el intervalo entre aquellos dos valores, (ver Artículo 5.3.1).

Dependiendo de si se fija la escala temporal de análisis o el nivel de avería de interés, el árbol para la toma de decisiones puede adoptar, respectivamente, la forma de árbol de probabilidad o de árbol de supervivencia. La conexión entre las dos caracterizaciones de las estrategias de reparación se efectúa por medio de la función de fiabilidad $R(t)$.

Árbol de probabilidad

Representa gráficamente en un intervalo de tiempo (por ejemplo una estación, un año o la vida útil) la probabilidad de que se alcance un nivel de avería de cada componente que participa en el árbol. Esta probabilidad está condicionada a la “probabilidad de éxito” de cada decisión de reparación que, a su vez, depende de los procedimientos y medios asignados a la misma.

Árbol de supervivencia

Representa gráficamente, para un nivel de avería de cada componente (habitualmente aquél que produce el fallo), el tiempo medio de supervivencia, (u otro estadístico), desde el instante t_0 hasta que se alcanza el fallo. Este tiempo está condicionado a la “probabilidad de éxito” de cada decisión de reparación que, a su vez, depende de los procedimientos y medios asignados a la misma.

2.7 IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE PROYECTO Y COMPONENTES CRÍTICOS

De acuerdo con la ROM 0.0-01, apartado 3.4, el conjunto de factores de proyecto son los parámetros, agentes y acciones para definir, dimensionar, verificar y optimizar el Proyecto de Construcción. Su ordenación por clases facilita el análisis de sensibilidad y la formulación y resolución del sistema dual de optimización. Para formular la función objetivo y las correspondientes restricciones de cada uno de los problemas de optimización, técnico-económico y económico-financiero, es necesario gestionar de forma ordenada y debidamente clasificada la información procedente del dimensionamiento y de la verificación del dique, tramo, sección y elementos, Sección 5 de esta ROM 1.1-18.

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

Las técnicas de identificación y clasificación, (árboles de clasificación, bosques aleatorios, etc.), alimentadas mediante información, por ejemplo, procedente de simulaciones de Monte Carlo (Solarí y Van Gelder, 2011), son herramientas de apoyo para identificar y clasificar aquellos factores de proyecto y componentes de la obra (tramos, subsistemas, modos, etc.) cuya avería/fallo contribuye en mayor medida al riesgo de la obra, (bien sea de forma individual o por su papel en el desencadenamiento de otras averías), y su dependencia de las estrategias de reparación que controlan dicho riesgo.

Se apoyan en algoritmos de aprendizaje y cumplen la doble función de (1) identificar aquellos predictores relevantes para modelar, entre otros, el rango de valores que puede tomar una variable respuesta de interés, (vida útil residual, costes de reparación, etc.), y (2) construir modelos de los resultados más probables de una determinada estrategia en función de los predictores caracterizados.

COMENTARIO

En el siguiente ejemplo se analiza la evolución de tres modos de fallo A, B y C, que se corresponden con los modos (MF1), (MF2) y (MF3) del árbol de desencadenamiento y propagación de la figura 2.19 con diferentes estrategias de reparación para determinar aquella cuya implementación tiene el coste menor. Cada estrategia se caracteriza por,

- el valor de la avería para el que se inicia la reparación de cada modo (predictores R_A , R_B y R_C),
- el tiempo unitario de reparación de cada modo (predictores t_A , t_B y t_C),
- los costes de la maquinaria de reparación son inversamente proporcionales a su rendimiento, y
- si uno, o más, modos alcanza el nivel de destrucción se calcula y se incluye en el coste de reconstrucción.

La figura 2.20 contiene el árbol de clasificación del factor de proyecto coste total de la reparación en función de cuándo se inicia la reparación y su duración.

En la figura 2.21 se muestra la importancia relativa de algunos de los predictores que definen las estrategias de reparación. Éste es uno de los resultados obtenidos con la aplicación del algoritmo, acotados por el rango de valores empleados en la simulación.

El algoritmo de clasificación (en este caso, uno de tipo árbol), alimentado con resultados de los costes de cada estrategia obtenidos mediante simulación, explica el valor del coste total durante la fase de reparación.

En la figura 2.20, cada rombo indica el valor de referencia de un predictor, (ver leyenda a la izquierda), que el algoritmo encuentra relevante para explicar el coste. Para valores del predictor menores al de referencia, se consideran las ramas de la izquierda (señaladas con un signo -), en otro caso se consideran las ramas de la derecha (señaladas con un signo +). Los resultados en los rectángulos representan el coste esperado según las ramas seguidas, expresado en función del coste de referencia, C_0 , (véase ROM 0.0-01 y ROM 1.0-09).

Figura 2.20: Algoritmo de clasificación del coste total por reparación, en función de las estrategias de inicio de reparación y de su duración

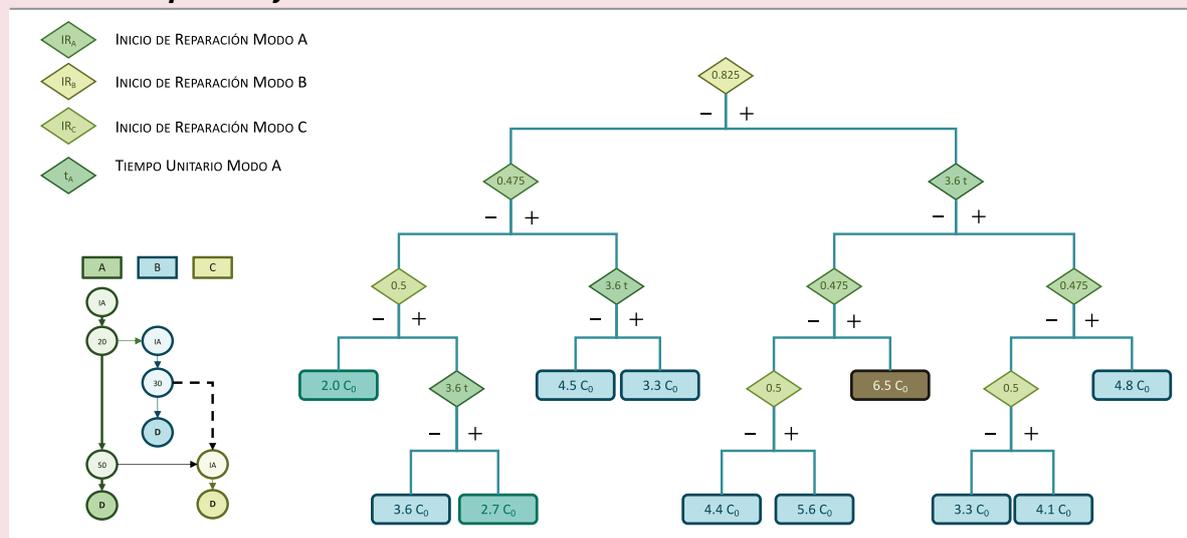
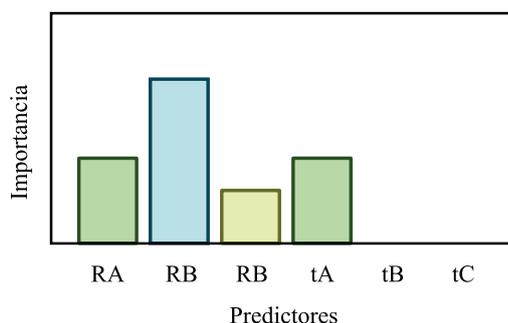


Figura 2.21: Importancia relativa de los predictores que definen las diferentes estrategias de reparación

2.8 VARIANTES EN LA CONCEPCIÓN Y DISEÑO DE UN DIQUE DE ABRIGO

En esta Sección 2 se presentan las bases específicas para el Proyecto de Construcción de un dique de abrigo (u otra infraestructura marítima). La estructura organizativa y la jerarquización espacio-temporal del Proyecto de Construcción abren un abanico de variantes para concebir y diseñar un dique de abrigo, su forma en planta, seleccionar la tipología en cada tramo y dimensionar sus elementos en función de los requisitos de proyecto, el reparto de la probabilidad conjunta frente a la seguridad y la operatividad, los costes totales y los condicionantes sociales, ambientales y legales.

Entre las variantes posibles se analizan, a continuación, tres de ellas que son representativas de, (1) clásico cuyos textos más representativos son ROM 0.0-01 y PIANC, 2016, (2) considerando la evolución del daño y (3) integrado en el sistema dual ROM-MEIPOR que permite afrontar la optimización técnico-económica y económica-financiera de la inversión con las restricciones asociadas a los requisitos de proyecto (ROM 0.0-01) y a su sostenibilidad financiera con un riesgo aceptable (MEIPOR-16).

2.8.1 Variante I: Tramos con modos de fallo y de parada independientes y nivel máximo de daño

Esta variante es la que se desarrolla en los textos de la ROM (ROM 0.2-90 (1990), ROM 0.0-01 (2001) y ROM 1.0-09. (2009), y PIANC, 2016. Entre otras, la hipótesis que sustenta su aplicación es la independencia espacial y temporal del comportamiento de cada tramo y de sus modos de fallo y de parada frente a los agentes climáticos y el terreno.

La aplicación de esta variante incluye lo siguiente,

- ◆ los modos de fallo principales de un tramo se grafican por un diagrama en serie o mediante un árbol específico que conduce a niveles máximos de daño o a la ruina de la obra;
- ◆ los modos de fallo principales se adscriben a ELU (aunque su comportamiento concuerda con ELS);
- ◆ el reparto de la probabilidad conjunta se aplica a los modos principales, y los restantes modos (no principales) se diseñan siguiendo normas de buena práctica;
- ◆ la optimización técnico-económica de los costes totales del tramo.

La optimización se aplica, habitualmente, al modo de fallo pésimo (aunque no hay ninguna razón técnica para que no se aplique a cada uno de los modos principales), admitiendo que,

- ◆ no hay afección entre tramos,
- ◆ se repara siempre de forma inmediata,
- ◆ no hay limitaciones presupuestarias
- ◆ no hay incidencia en la operatividad del área

2.8.2 Variante 2: Tramos con modos de fallo y de parada independientes y evolución temporal de la avería

Esta variante es la que se desarrolla en los textos de la ROM 0.0-01 y ROM 1.1-18-MEIPOR (2006). Entre otras, la hipótesis que sustenta su aplicación es la independencia espacial de la evolución temporal del comportamiento del tramo y de sus modos de fallo y de parada frente a los agentes climáticos y el terreno.

La aplicación de esta variante incluye lo siguiente,

- ◆ los modos de fallo principales de un tramo se grafica por un diagrama en serie/paralelo o mixto, o mediante un árbol específico que conduce a niveles máximos de daño o a la ruina de la obra;
- ◆ la probabilidad conjunta de fallo (ELU) se adjudica al nivel de daño destrucción;
- ◆ el reparto de la probabilidad conjunta se aplica a los modos principales, y los restantes modos (no principales) se diseñan siguiendo normas de buena práctica;
- ◆ se analiza de la evolución acumulada de la avería y se desarrollan estrategias específicas de reparación;
- ◆ la optimización técnico-económica de los costes totales del tramo considera la evolución independiente de cada modo de fallo principal y estrategias de reparación y toma de decisiones prefijadas;
- ◆ incardinación de este proceso con la optimización económica-financiera y con
- ◆ el análisis de sensibilidad y evaluación del riesgo de la inversión;

Es conveniente aplicar la optimización a los modos cuya ocurrencia más contribuya a los costes totales de la infraestructura (modos principales), admitiendo que,

- ◆ no hay afección entre tramos,
- ◆ no se repara siempre de forma inmediata,
- ◆ si hay limitaciones presupuestarias
- ◆ mayormente sin incidencia en la operatividad del área

2.8.3 Variante 3: Tramos con modos de fallo y de parada concomitantes/dependientes y concatenación de otros modos de fallo

Esta variante es la que se aplica en la optimización dual ROM 1.1-18-MEIPOR (2016). Se admite que los tramos y sus modos de fallo y de parada pueden evolucionar espacial y temporalmente de forma simultánea y desencadenar otros modos frente a los agentes climáticos y el terreno.

La aplicación de esta variante incluye lo siguiente,

- ◆ los modos de fallo principales de un tramo se grafica por un diagrama en serie/paralelo o mixto;
- ◆ la probabilidad conjunta de fallo (ELU) se adjudica al nivel de daño destrucción;
- ◆ el reparto de la probabilidad conjunta se aplica a los modos principales, considerando valores de los agentes y acciones simultáneos y compatibles; los restantes modos (no principales) se diseñan siguiendo normas de buena práctica;
- ◆ estudio de la evolución acumulada de la avería y elaboración de los árboles de desencadenamiento y propagación de la avería entre modos;
- ◆ elaboración de las estrategias de reparación ¿cuándo?, ¿cómo?, ¿cuánto? y criterios para la toma de decisiones,
- ◆ optimización dual (técnico-económica y económica-financiera) de los costes totales y de la sostenibilidad financiera de los Proyectos de Construcción e Inversión;
- ◆ análisis de sensibilidad y evaluación del riesgo de la Inversión.

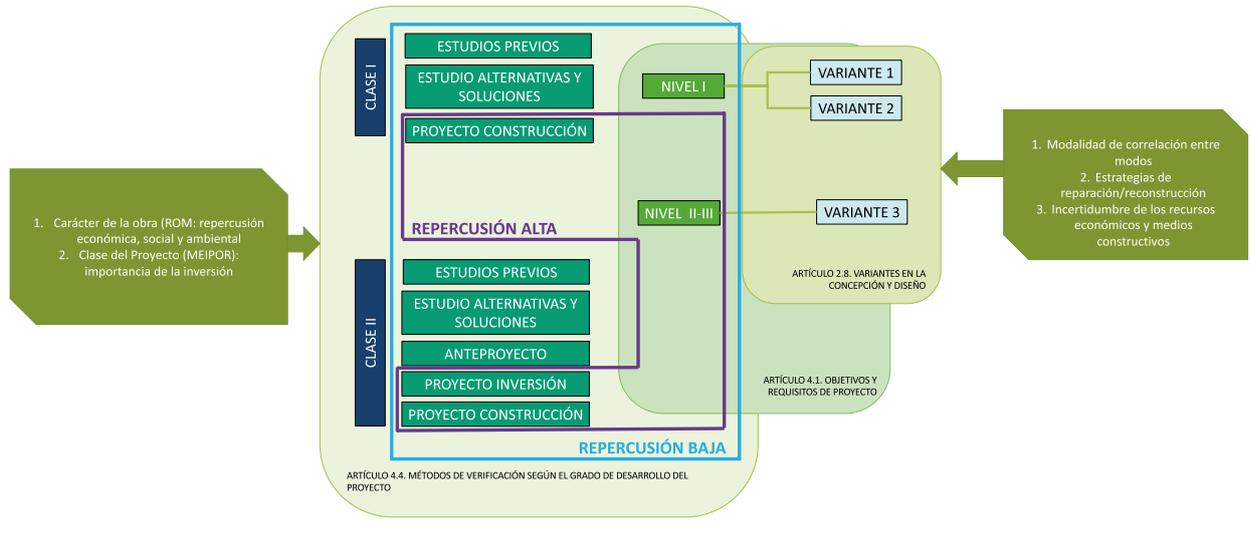
La aplicación de la optimización dual conlleva considerar y cuantificar,

- ◆ la afección entre tramos, y su incidencia en las estrategias de reparación,
- ◆ que no se repare de forma inmediata y sus consecuencias,
- ◆ las limitaciones presupuestarias y en la distribución temporal de los recursos,

- ◆ la incidencia en la operatividad del área de las averías y sus estrategias de reparación.

La figura 2.22 muestra la interconexión entre las Variantes y su concepción, los métodos de verificación (según la metodología ROM) y las clases de proyectos (MEIPOR).

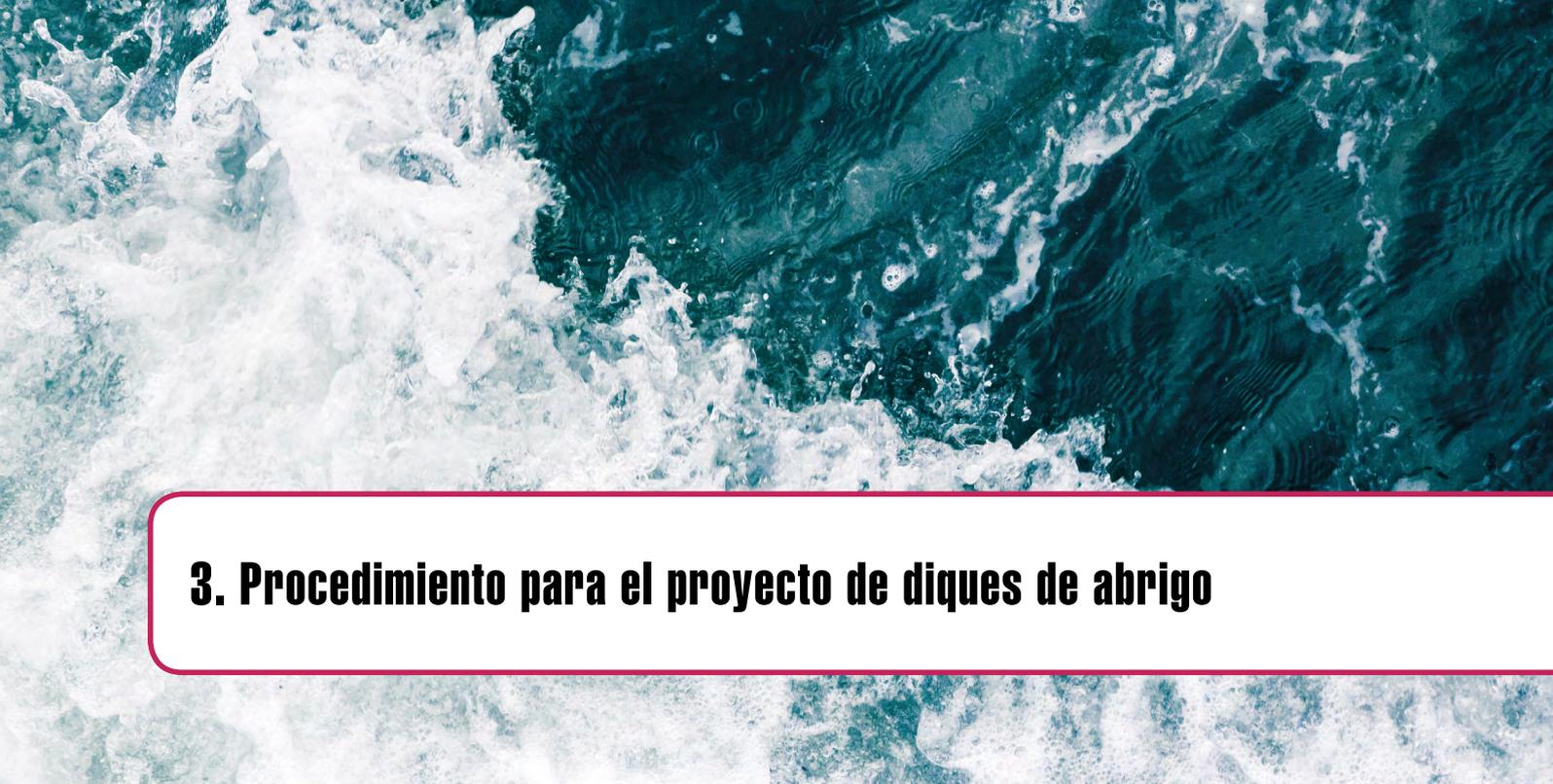
Figura 2.22: Interconexión entre variantes, métodos de verificación y clases de proyectos



Índice Sección III

SECCIÓN III: PROCEDIMIENTO PARA EL PROYECTO DE DIQUES DE ABRIGO

3.1	CONCEPCIÓN DE LA OBRA Y SECUENCIA DE DISEÑO	85
3.1.1	Herramientas para la concepción de la obra	86
3.1.2	Secuencia lógica de actividades	88
3.2	TIPOLOGÍA Y CRITERIOS PARA SU SELECCIÓN	90
3.2.1	Descripción de una tipología	91
3.2.2	Factores técnicos y ambientales para la selección de tipologías	91
3.2.3	Factores económicos para la selección de tipologías	93
3.3	COMPORTAMIENTO DEL DIQUE Y CONFIGURACIÓN DE DIAGRAMAS	93
3.3.1	Diagramas de componentes frente a la seguridad	93
3.3.2	Diagramas de componentes frente a la operatividad	99
3.4	MODOS PRINCIPALES DE FALLO Y DE PARADA EN UN DIQUE DE ABRIGO	101
3.4.1	Tramo con alineación recta	102
3.4.2	Tramos con alineaciones no rectas y transiciones	105
3.4.3	Modos principales provocados por otros agentes en el emplazamiento	108
3.4.4	Modos en las fases de construcción, conservación y reparación	108
3.4.5	Modos de parada relacionados con las actividades del área portuaria	108
3.5	REPARTO DE LA PROBABILIDAD CONJUNTA DE FALLO Y PARADA EN EL TRAMO	109
3.5.1	Selección de modos principales y no principales	109
3.6	ÁRBOLES DE DESENCADENAMIENTO Y PROPAGACIÓN DEL FALLO O PARADA	110
3.6.1	Diseño frente a la seguridad (condiciones de trabajo extremas)	111
3.6.2	Diseño frente a la operatividad (condiciones de trabajo operativas normales)	115
3.6.3	Diseño frente a condiciones de trabajo post-excepcionales	115
3.7	DISEÑO A EVOLUCIÓN DE LA AVERÍA Y ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN	115
3.7.1	Elaboración de estrategias de reparación	116
3.7.2	Árbol para la toma de decisiones entre estrategias de reparación	117
3.8	ORGANIZACIÓN DE LA OBRA, PROCESOS Y MEDIOS	119
3.8.1	Estudios preliminares	119
3.8.2	Descripción de las subfases constructivas y procedimientos	119
3.8.3	Planificación de la estrategia de construcción	119



3. Procedimiento para el proyecto de diques de abrigo

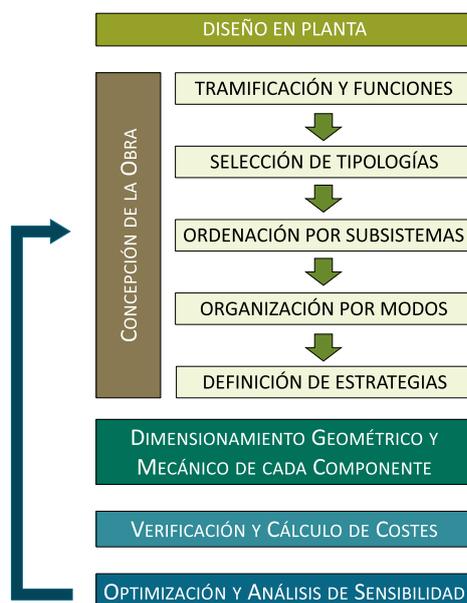
De acuerdo con las bases específicas para el proyecto, Sección 2 de este Articulado, el Proyecto de Construcción de un dique de abrigo se elabora según la siguiente secuencia: (a) diseño en planta, (b) concepción de la obra y deslinde de tramos, (c) selección de las tipologías de cada tramo, (d) dimensionamiento, (e) verificación de los requisitos técnicos, legales y ambientales, (f) cálculo de los costes totales y (g) optimización técnico-económica y análisis de sensibilidad.

Esta Sección 3 se dedica a: (1) describir un conjunto conexo de tipologías de diques de abrigo; (2) organizar los tramos y sus partes en subsistemas e identificar en cada uno de ellos los modos principales de fallo, y (3) caracterizar cada uno de los modos y su evolución espacio-temporal. Estas son algunas de las actividades a realizar previamente a la verificación del cumplimiento de los requisitos de proyecto, la optimización técnico-económica del dique y sus tramos, y la verificación del cumplimiento de las restricciones financieras y económicas determinadas en el Proyecto de Inversión tal y como se describe en las Secciones 4 y 5.

3.1 CONCEPCIÓN DE LA OBRA Y SECUENCIA DE DISEÑO

En esta Sección se propone una secuencia general y las herramientas necesarias para diseñar, dimensionar, verificar y optimizar un dique y sus tramos. En la figura 3.1 se representan los elementos de esta secuencia y el flujo de la información generada.

Figura 3.1: Secuencia general para la concepción y diseño de un dique de abrigo



3.1.1 Herramientas para la concepción de la obra

La concepción de la obra es una facultad del proyectista que se puede apoyar, entre otras, en las herramientas descritas en la Sección 2 (diagramas, árboles de desencadenamiento y propagación y árboles de decisión). Su uso ayuda a concebir la obra, exponer su razón y ser y definir sus dimensiones. La figura 3.2 presenta un cuadro de herramientas y sus interrelaciones según la escala espacial de trabajo, los diagramas de componentes y la propagación de los modos de fallo.

Previamente, es conveniente especificar, a priori, las condiciones necesarias y suficientes para declarar cuándo y cómo el dique (sus tramos, partes y elementos) incumplen los objetivos,

- del Proyecto de Construcción del dique teniendo en cuenta todos sus tramos, partes, y subsistemas, frente a la seguridad y la operatividad propia del tramo,
- del Proyecto de Inversión del área portuaria frente a la rentabilidad económica y financiera y el riesgo de la inversión de la infraestructura y el área portuaria.

La caracterización del incumplimiento de los objetivos de proyecto (fallo frente a la seguridad y parada frente a la operatividad) se apoya en el espacio de sucesos y el conjunto de modos que pueden ocurrir en la obra y, a partir del mismo, se construyen los diagramas de componentes organizados por niveles jerárquicos (ver Artículo 3.3). Estos diagramas son la representación gráfica de una concepción de la obra, y su concreción variará con el carácter y el grado de desarrollo del proyecto.

Selección y conformación de los niveles jerárquicos

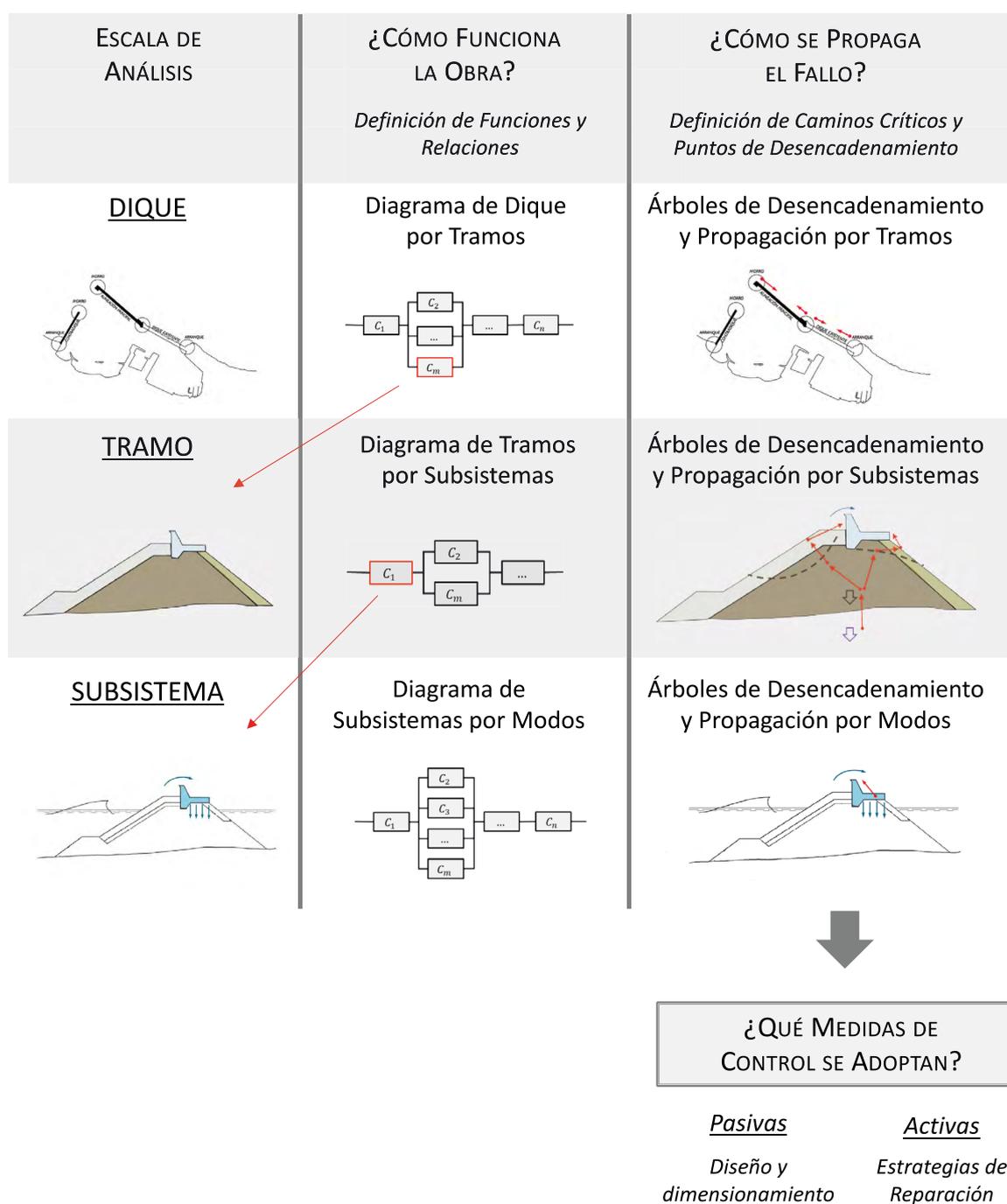
A estos efectos, la obra se concebirá como una secuencia de niveles jerárquicos conformando:

- el dique con un conjunto de tramos y elaborando su espacio de sucesos y el correspondiente diagrama de tramos del dique;
- cada tramo con un conjunto de subsistemas y elaborando sus espacios de sucesos y los correspondientes diagrama de subsistemas del tramo;
- cada subsistema con un conjunto de elementos y elaborando sus espacios de sucesos y los correspondiente diagramas de modos de fallo o de parada del subsistema.

Inclusión de la evolución espacio-temporal

Cuando se diseñe considerando la evolución espacio-temporal de cada modo de fallo, el proyectista debe asentar un camino crítico del progreso la avería entre componentes elaborando uno, o más, árboles de desencadenamiento y propagación específicos (ver Artículo 3.6). Del mismo modo el proyectista debe especificar las posibles estrategias de reparación (expresadas por medio de uno, o más, árboles de decisión, ver Artículo 3.7), calcular los costes totales de la obra y comprobar que la obra se ajusta a su concepción y finalidad.

Figura 3.2: Herramientas y secuencia lógica para la concepción de la obra según la escala de análisis, cómo trabaja y cómo se propaga el fallo

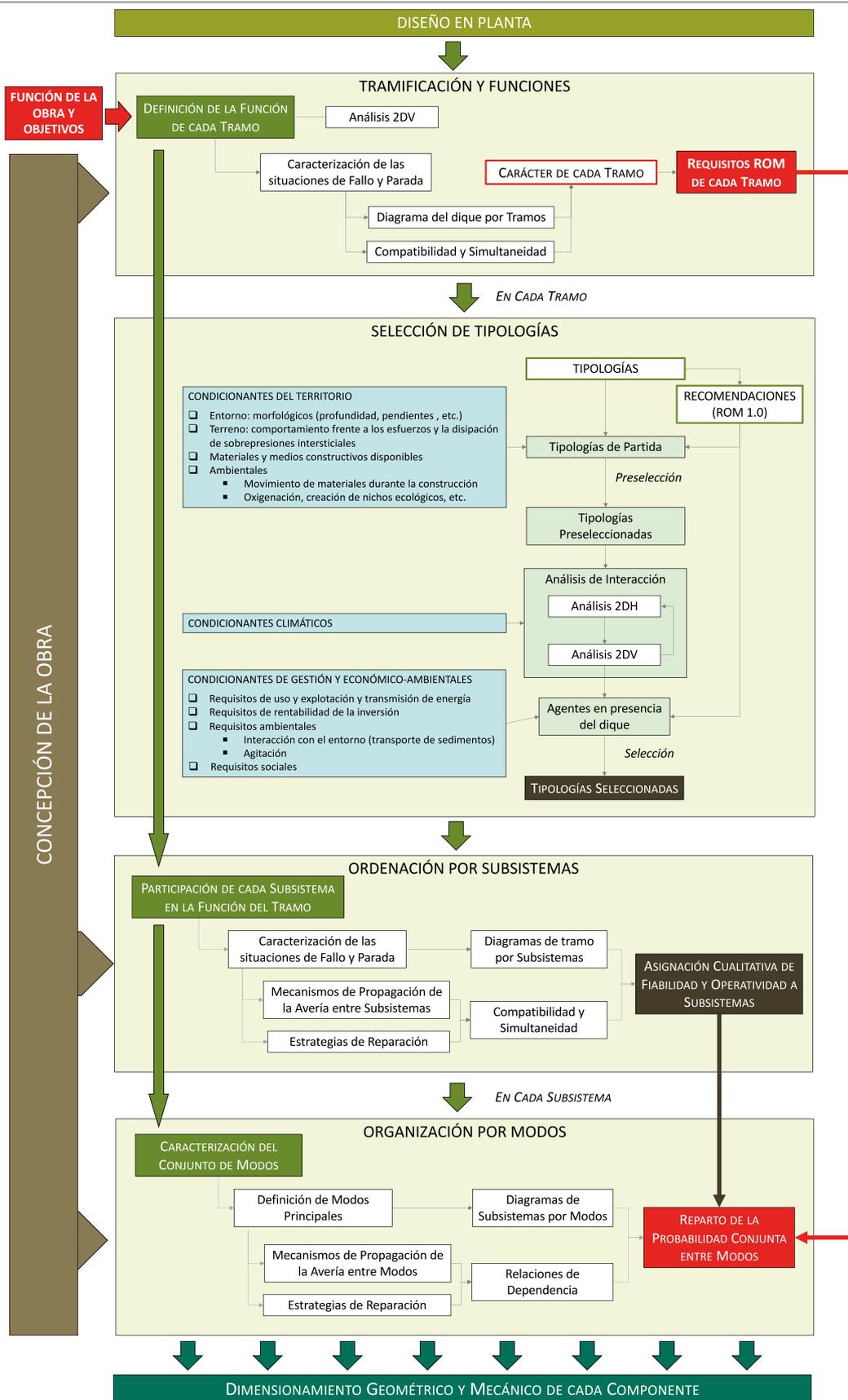


3.1.2 Secuencia lógica de actividades

En la figura 3.3 se representa una secuencia de actividades para la concepción de la obra. Ésta se inicia seleccionando una planta del dique y se finaliza con el dimensionamiento geométrico y mecánico de cada uno de sus componentes, (elemento, parte, subsistema y tramo). Entre otras, se proponen las siguientes,

- ◆ Estructurar la obra por niveles jerárquicos y asignar a cada uno de ellos su función y objetivos. Seleccionar las tipologías más adecuadas para cumplir con aquellos atendiendo al conjunto de requisitos y condicionantes de la obra.
- ◆ Caracterizar las situaciones que suponen el fallo o parada de cada componente (tramos, subsistema, elemento, etc.), de acuerdo con la concepción general de la obra y los niveles jerárquicos adoptados.
- ◆ Realizar los diagramas de componentes que describen el comportamiento deseado de la obra en cada nivel jerárquico.
- ◆ Seleccionar los modos principales frente a la seguridad y la operatividad, describir sus procesos, especificar los criterios de fallo y parada y su nexo con las funciones y objetivos de cada componente.
- ◆ Definir el umbral que caracteriza cada uno de los niveles de daño o avería y analizar las posibles relaciones de dependencia entre los diferentes modos de fallo en cada subsistema, en el tramo y en el dique.
- ◆ Especificar a priori el reparto de la probabilidad de fallo y de parada en el tramo y su distribución en cada nivel jerárquico, considerando las relaciones de dependencia entre modos y las estrategias de reparación que afectan a su probabilidad de ocurrencia conjunta.
- ◆ Integrar los resultados anteriores en un proyecto del dique y sus componentes, comprobando que,
 - (a) la probabilidad de ocurrencia de los modos no principales es despreciable, y
 - (b) sus relaciones de dependencia se adecúan a las condiciones de simultaneidad y compatibilidad de modos.

Figura 3.3: Secuencia lógica para la concepción de la obra y su dimensionamiento

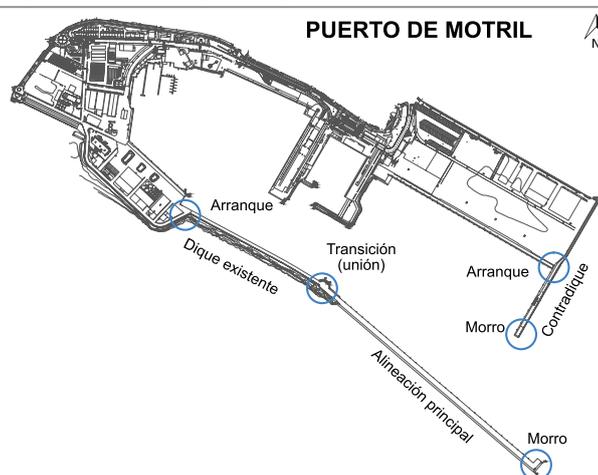


3.2 TIPOLOGÍA Y CRITERIOS PARA SU SELECCIÓN

Para seleccionar una tipología que cumpla los requerimientos de proyecto es conveniente aplicar la secuencia lógica descrita en el Artículo anterior y esquematizada en las figuras 3.2 y 3.3. En particular,

- dividir la traza del dique en tramos (ver Artículo 2.2.2), considerando que una alineación puede estar formada por más de un tramo (ver figura 3.4);
- especificar en cada tramo los requisitos de proyecto según su nivel de participación en el cumplimiento de los objetivos del proyecto de la infraestructura (ver Artículo 4.1.1);
- asignar a cada tramo una o más tipologías, (formal y estructural), teniendo en cuenta que sus dimensiones geométricas pueden variar gradualmente para adecuarse a los cambios suaves de la batimetría, naturaleza del lecho y características del oleaje, principalmente.
- organizar jerárquicamente cada tipología en subsistemas y éstos en las unidades que los componen, identificando las funciones de cada uno en el comportamiento del tramo.

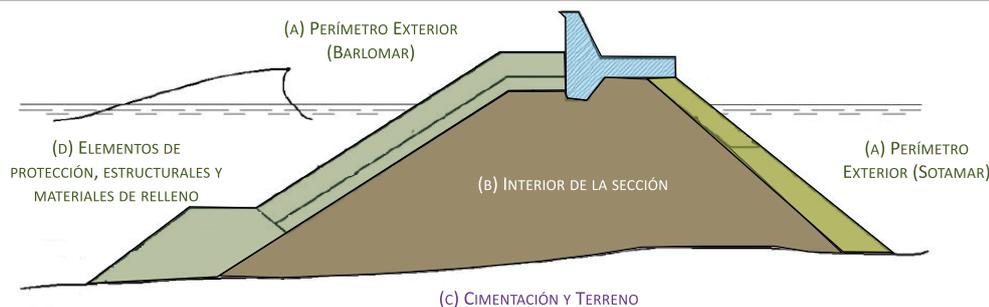
Figura 3.4: Tramos en el dique y en el contradique del puerto de Motril



Seguidamente, para cada tipología, se identificarán, entre otros, los siguientes subsistemas, (ver ejemplo de la figura 3.5),

- perímetro exterior, barlomar y sotamar, de la sección,
- interior de la sección,
- cimentación y terreno,
- elementos de protección, estructurales y materiales de relleno.

Figura 3.5: Subsistemas de un tramo de dique en talud: (a) perímetro exterior, (b) interior de la sección, (c) cimentación y terreno y (d) elementos de protección, estructurales y materiales de relleno



3.2.1 Descripción de una tipología

La sección de la tipología se describirá en función de, al menos, tres partes, e identificando los posibles subsistemas,

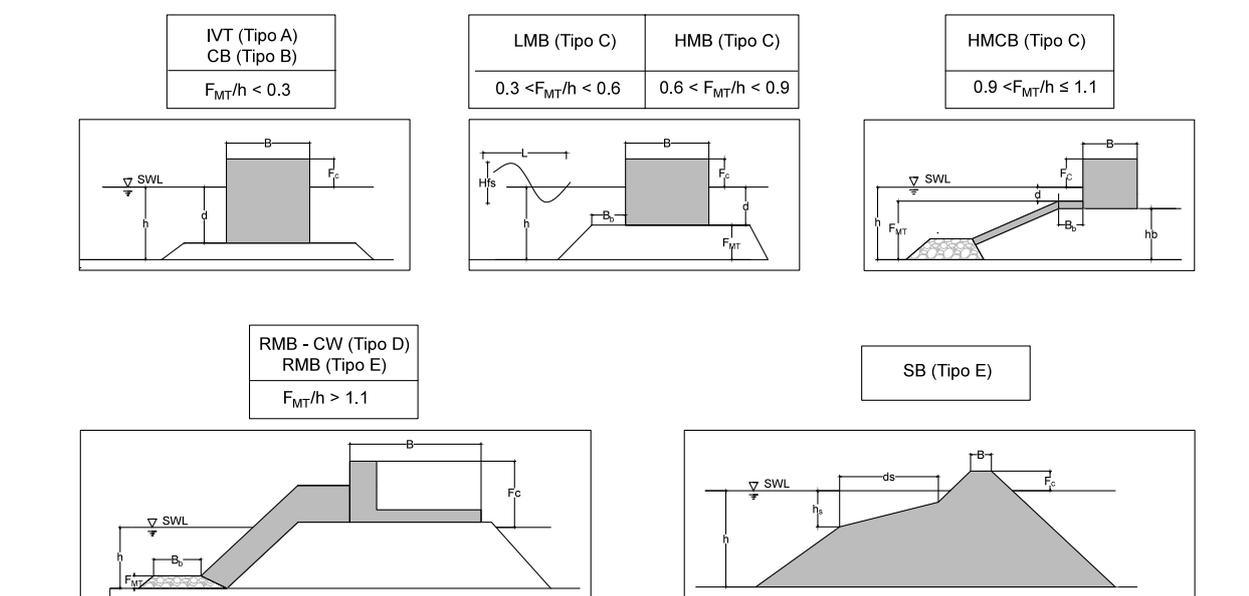
- cimentación, que determina la forma en que la estructura transmite los esfuerzos al terreno, formado por, (a) una capa de limpieza y enrase y (b) el manto o capa de cimentación propiamente dicho
- cuerpo central, que determina el comportamiento hidrodinámico del oleaje, formado por, (a) el perímetro exterior, barlomar y sotamar, que controla la transformación del oleaje, y (b) el interior de la sección que controla su propagación a sotamar y transmite a la cimentación la resultante de las acciones,
- superestructura, que controla el rebase sobre la coronación, la conexión entre tramos y, en su caso, ofrece un camino de rodadura.

En su caso para mejorar y ampliar la descripción y el diseño el proyectista puede considerar la oportunidad de definir otras partes del dique.

En la figura 3.6 se representan algunas secciones habituales de dique de abrigo. Son referencias puntuales de un conjunto conexas de tipologías posibles. La disposición y dimensiones de cada una de sus partes varían gradualmente entre ellas. Éstas podrán estar formadas por sistemas granulares, elementos naturales y artificiales de protección, sólidos rígidos y otros elementos estructurales.

Las dos tipologías tradicionales, dique vertical o reflejante y dique en S o disipativo, (también llamado dique berma), delimitan el comportamiento hidrodinámico del conjunto de tipologías frente a la partición de la energía incidente del oleaje. Entre aquellas, se encuentran las tipologías mixtas o compuestas y el dique rompeolas tradicional o dique Iribarren y todas sus posibles variantes.

Figura 3.6: Tipologías de dique habituales (grafismo y nomenclatura tomados de Kortenhuis y Oumeraci, 1998)



3.2.2 Factores técnicos y ambientales para la selección de tipologías

Se considerarán, entre otros, los siguientes factores técnicos (ver apartado 2.2.4 de la ROM 1.0-09),

- comportamiento frente a los agentes climáticos marítimos, en particular el oleaje,
- naturaleza del terreno, interacción con los agentes climáticos y respuesta del mismo,
- condicionantes morfológicos, entre otros, topografía, batimetría, superficie terrestre,

- (d) disponibilidad de materiales y medios constructivos,
- (e) requerimientos de uso y explotación y de entrada parcial en servicio,
- (f) requerimientos ambientales y legales.

Interacción del dique y tramos con el oleaje y otras oscilaciones del mar

El diseño y la selección de la tipología de dique deben apoyarse en los análisis de la interacción en planta (análisis 2DH) y alzado (análisis 2DV) del conjunto de la obra y de los contornos con las oscilaciones del mar, principalmente el oleaje tal y como se recoge en la figura 3.3. Entre otros, este análisis debe proporcionar los siguientes resultados, (a) la partición de energía incidente en cada tramo en función de las características del tren incidente para los diferentes sectores de incidencia del oleaje, y (b) la variación a lo largo de la traza del dique del tren incidente provocada por la radiación/reflexión/transmisión de la energía desde,

- (a) los tramos específicos, principalmente morro, arranque y cambios de alineación,
- (b) la coronación y a través de la sección,
- (c) los cambios de tipología en el tramo y entre tramos,
- (d) los cambios bruscos de profundidad y características del lecho y, en su caso, terreno.

INTERACCIÓN DIQUE-OLEAJE

Es conveniente iniciar el análisis 2DH repartiendo, a priori, la energía del oleaje en cada tramo en función de la tipología y de las características del tren incidente, ángulo de incidencia relativa con el tramo, θ , profundidad relativa, h/L y periodo, T_s , principalmente. Esta primera aproximación debe ayudar a determinar,

- ◆ el comportamiento hidrodinámico del dique en su conjunto,
- ◆ si algunos tramos de la traza del dique están en zona de rompientes, y
- ◆ si, de forma específica, el oleaje resultante de la interacción dique-oleaje puede romper en el frente y pie de algunos tramos, aunque el oleaje incidente no rompiera en ausencia del dique.

CIRCULACIÓN Y CALIDAD DE AGUA E INTERACCIÓN CON LA MORFOLOGÍA LITORAL

Aplicando los métodos y herramientas recogidas en la ROM 5.1-13, es conveniente realizar un análisis 2DH de la circulación y calidad del agua y del transporte de sedimentos en el área portuaria y en su entorno cercano y lejano. En su caso, se incluirá la evolución espacio-temporal de la calidad de agua y la transformación espacio-temporal de la morfología litoral en el conjunto de los modos de fallo y de parada operativa del área portuaria. El resultado de la verificación depende de la disposición de las infraestructuras del área portuaria y, en particular, de la tipología del dique de abrigo.

REVISIÓN DEL REPARTO DE LA ENERGÍA INCIDENTE

En el análisis 2DV se cuantifica la partición de la energía mediante el cálculo de los coeficientes de reflexión, transmisión y disipación (ver apartado 2.2.2 de la ROM 1.0-09). Este resultado debe contrastarse con el reparto inicial adoptado en el análisis 2DH y, en caso de discrepancia significativa, se debe repetir el análisis hasta que los resultados de ambos estudios sean concordantes. Para la realización del análisis 2DV se pueden emplear datos provenientes de ensayos experimentales o numéricos (Lara et al., 2011).

Análisis comparativo del comportamiento de las tipologías frente al oleaje

Para comparar el comportamiento de las diferentes tipologías se tendrán en cuenta, entre otros, los siguientes aspectos:

- (a) Comportamiento frente a los agentes climáticos marítimos,

- ◆ rotura, o no, en el frente o sobre el dique y tipo de rotura,
 - ◆ partición de la energía incidente en el dique: disipativo/reflejante,
 - ◆ variación espacial de la altura de ola sobre la sección del dique.
- (b) Interacción con la obra y respuesta del terreno,
- ◆ presiones sobre la superestructura: impulsivas/reflejantes,
 - ◆ movilidad, o no, del lecho: potencial de formación de barras y senos,
 - ◆ capacidad portante del terreno: blando/muy deformable,
 - ◆ capacidad de disipación de sobrepresiones intersticiales y potencial de licuefacción momentánea.
- (c) Requerimientos de uso y explotación y de entrada parcial en servicio,
- ◆ transformación del oleaje en la zona de abrigo y reflexiones generadas, y superficie afectada,
 - ◆ rebase por la coronación del dique: ocasional/frecuente/rebasable no sumergido.
- (d) Requerimientos ambientales,
- ◆ oscilaciones del mar en el área portuaria y entorno del dique y superficie afectada,
 - ◆ calidad del agua en el área portuaria y su entorno,
 - ◆ procesos de transporte de sedimentos en el área portuaria y su entorno,
 - ◆ evolución espacio-temporal del entorno litoral y línea de costa.

Estos resultados son una ayuda para caracterizar los modos de fallo y de parada del tramo y sus mutuas interacciones, y los posibles procesos de desencadenamiento y propagación espaciotemporal de las averías.

3.2.3 Factores económicos para la selección de tipologías

En general, debido a las severas condiciones en las que se ubican los diques de abrigo y el fuerte impacto de sus costes de construcción, conservación, reparación y desmantelamiento en los costes del Proyecto de Inversión, la selección de la tipología debe satisfacer los requisitos de la inversión, tanto en lo que respecta a su magnitud como a su distribución a lo largo del tiempo. Para ello se recomienda clasificar las tipologías posibles atendiendo, entre otros, a los siguientes indicadores económicos, cuyo cálculo se detalla en la Sección 5,

- ◆ costes de la inversión inicial según la tipología (construcción y desmantelamiento), y
- ◆ costes anuales medios según la tipología (conservación y reparación).

Es útil (produce beneficios) acotar la selección técnico-económica de una tipología por dos tipologías “limitantes”,

- (a) estructuralmente robustas, simples y durables con costes medios de inversión inicial elevados, pero con bajos costes anuales medios de conservación y una baja probabilidad de avería durante su vida útil, y
- (b) estructuralmente concebidas con capacidad de acumular daños manteniendo su finalidad, pero con costes de la inversión inicial contenidos y sus costes anuales medios de conservación y reparación elevados, que pueden ser significativos para cumplir con los requisitos de sostenibilidad financiera y riesgo aceptable del Proyecto de Inversión.

3.3 COMPORTAMIENTO DEL DIQUE Y CONFIGURACIÓN DE DIAGRAMAS

De acuerdo con el Artículo 2.3.4 de la Sección 2, la respuesta de la obra frente a los agentes climáticos, del terreno y uso y explotación se expresa gráficamente mediante unos diagramas de componentes (fiabilidad estructural) y de parada operativa (operatividad). En este Artículo se proporcionan las bases para su elaboración y se muestra de forma esquemática su aplicación.

3.3.1 Diagramas de componentes frente a la seguridad

Con carácter general los diagramas frente a la seguridad se elaborarán por orden jerárquico, considerando, (a) el tramo como componente del dique, (b) el subsistema como componentes del tramo y (c) el modo de fallo como componente del subsistema. En su caso, el diagrama de componentes incluirá la evolución espacio-temporal del fallo frente a la seguridad.

Configuración sin y con evolución de la avería

Si el dique se dimensiona suponiendo que el inicio de la avería de un componente, (tramo, subsistema o modo), es concordante con su destrucción, los diagramas se elaborarán teniendo en cuenta que,

- (a) se selecciona a priori el número de componentes mutuamente excluyentes (es decir, que no ocurren de forma simultánea),
- (b) la dependencia del fallo entre componentes es baja o está acotada, y
- (c) el fallo del componente es irreversible, y los costes (y el tiempo necesario) son los asociados a la reconstrucción completa del componente para recuperar la finalidad del dique.

Si el dique se diseña a evolución espacio-temporal de la avería de los componentes, los diagramas de componentes se elaborarán teniendo en cuenta,

- (a) la evolución temporal de, (a) la probabilidad conjunta de los modos de fallo de los subsistemas de un tramo, (o fiabilidad del tramo), y (b) la operatividad del dique y área portuaria,
- (b) las estrategias de reparación adoptadas incluyendo, (a) se interviene antes de alcanzar el nivel de destrucción, (b) el grado de dependencia y la simultaneidad de averías en los componentes, (c) la operatividad del dique y del área portuaria, y (d) los costes y tiempos de reparación (antes de la destrucción) del subsistema, tramo o dique.
- (c) si por las causas que fueren no se repara y se alcanza el nivel de destrucción, (a) los costes (y el tiempo necesario) son los asociados a la reconstrucción completa del componente, y (b) su probabilidad de ocurrencia debe incluirse en la verificación de la probabilidad conjunta de fallo.

Diagramas del dique por tramos

La configuración del diagrama del dique por tramos revela la razón y ser del dique, ayuda a definir las estrategias de reparación y configurar los árboles de decisión. En su caso, debe ayudar a identificar los tramos críticos, a reevaluar los índices de repercusión económica y social y ambiental y, a partir de ellos, recalcular los requisitos de proyecto, (1) vida útil, (2) probabilidad conjunta de fallo y (3) los indicadores de la operatividad.

Para ello, de acuerdo con la Sección 2 (Bases específicas para el proyecto, Artículo 2.2.2, figura 2.3), es útil proceder de la siguiente forma,

- ◆ deslindar los tramos del dique, entre otros, arranque, alineación secundaria, cambio de alineación, alineación principal y morro del dique,
- ◆ especificar cómo funciona y cómo y cuándo falla cada uno de los tramos,
- ◆ establecer las relaciones de dependencia entre ellos, e
- ◆ identificar, por diversas razones, aquellos que deban ser los más fiables de la infraestructura (p. ej. razones constructivas, de reparación o de conservación, operativas, etc.).

Seguidamente, se describe

- ◆ el espacio de sucesos de todas las posibles combinaciones de tramos fallados en el dique que puedan darse simultáneamente y a partir de él,
- ◆ cuando se considera que el dique falla, bien cuando lo hace al menos uno de sus tramos o bien cuando lo hacen dos o más tramos. En el primer supuesto el diagrama del dique es en serie. En otros casos, el diagrama del dique será, posiblemente, mixto.
- ◆ el cálculo de la probabilidad conjunta de fallo del dique.

La probabilidad conjunta de fallo del dique se calcula a partir de la probabilidad de fallo de los tramos teniendo en cuenta el número de tramos que deben fallar, y si los fallos de los tramos son mutuamente excluyentes o tienen una relación de dependencia entre ellos. Esta información es relevante para verificar si el dique en su conjunto (forma en planta) y en cada uno de sus tramos que lo conforman cumple los objetivos y finalidades del proyecto.

Diagramas del tramo por subsistemas

La configuración del diagrama del tramo por subsistemas revela cómo funciona la sección frente al oleaje y cómo transmite sus acciones a la cimentación y el terreno, ayuda a definir las estrategias de reparación y a configurar los árboles de decisión. Además, identifica los subsistemas críticos y, en su caso, es un apoyo para reevaluar sus índices de repercusión económica y social y ambiental del tramo y, a partir de ellos, para determinar su vida útil, su probabilidad conjunta de fallo y sus indicadores de operatividad.

Para ello, de acuerdo con la Sección 2 (Bases específicas para el proyecto, Artículo 2.2.2, figura 2.3), es útil proceder de la siguiente forma,

- ◆ ordenar el tramo en subsistemas, entre otros, perímetro exterior, interior de la sección, cimentación y terreno y elementos de protección, estructurales y materiales de relleno,
- ◆ especificar cómo funciona y cómo y cuándo falla cada subsistema,
- ◆ establecer las relaciones de dependencia entre subsistemas e
- ◆ identificar aquellos que deben ser los más fiables del tramo.

Esta concepción del tramo debe plasmarse en el reparto entre subsistemas de la probabilidad conjunta de fallo frente a la seguridad (requisito de proyecto). Seguidamente, se describe

- ◆ el espacio de sucesos de todas las posibles combinaciones de subsistemas fallados en el tramo que puedan darse simultáneamente y a partir de él,
- ◆ cuando se considera que el dique falla, (a) bien cuando lo hace al menos uno de sus subsistemas, bien cuando lo hacen dos o más subsistemas. En el primer supuesto el diagrama del tramo es en serie. En otros casos, el diagrama del dique será, posiblemente, mixto.
- ◆ cálculo de la probabilidad de fallo de cada subsistema.

La probabilidad conjunta de fallo del tramo se calcula a partir de la probabilidad de fallo de los subsistemas, teniendo en cuenta el número de subsistemas que deben fallar; y si los fallos de los subsistemas son mutuamente excluyentes o tienen una relación de dependencia entre ellos. Esta información es relevante para verificar si el tramo cumple los objetivos y finalidades del proyecto, y debe plasmarse en el reparto de la probabilidad conjunta de fallo entre los subsistemas que lo conforman.

COMENTARIO

La organización de subsistemas se fundamenta en el papel que desempeña en la partición de energía incidente (Clavero et al., 2012; Vélchez et al., 2016b) y en sus consecuencias en el flujo sobre y a través de la sección y en las presiones y subpresiones en elementos y superestructura (Vélchez et al., 2011).

Diagramas del subsistema por modos de fallo

La configuración del diagrama del subsistema por modos de fallo revela cómo resiste la acción del oleaje, ayuda a definir las estrategias de reparación y a configurar los árboles de decisión. Ayuda a identificar los subsistemas críticos, a reevaluar sus índices de repercusión económica y social y ambiental del tramo y, a partir de ellos, a determinar su vida útil, su probabilidad conjunta de fallo y sus indicadores de operatividad. Para ello, de acuerdo con la Sección 2 (Bases específicas para el proyecto, Artículo 2.2.2, figura 2.3), es útil proceder de la siguiente forma,

- ◆ ordenar el subsistema por conjunto de modos de fallo frente a la seguridad
- ◆ especificar cómo funciona y cómo y cuándo falla cada modo, en general, mediante una ecuación de verificación,
- ◆ establecer las relaciones de dependencia entre modos de fallo,
- ◆ identificar aquellos modos que son más críticos para la fiabilidad del subsistema y del tramo y aquellos que son principales y los que son no principales o susceptibles de serlo.

Seguidamente, se describe

- ◆ el espacio de sucesos de todas las posibles combinaciones de modos de fallo del subsistema que puedan darse simultáneamente y a partir de él,
- ◆ cuando ocurre el subsistema falla, bien cuando lo hace al menos uno de sus modos de fallo, bien cuando lo hacen dos o más modos. En el primer supuesto el diagrama del subsistema es en serie. En otros casos, el diagrama del subsistema será, posiblemente, mixto.
- ◆ Cálculo de la probabilidad de fallo de cada modo de fallo.

Esta información es relevante para verificar si el subtramo cumple los objetivos y finalidades del proyecto, y debe plasmarse en el reparto de la probabilidad conjunta de fallo entre los modos que lo conforman.

ESPACIO DE SUCESOS DE LOS MODOS DE FALLO: INICIO / DESTRUCCIÓN

Si se proyecta a inicio de avería / destrucción, es habitual declarar que el subsistema falla cuando ocurre, al menos, uno de sus modos (principales) de fallo y que éstos son mutuamente excluyentes. En este caso, la configuración del subsistema es un diagrama en serie de modos principales. Esta configuración implica que la ocurrencia de un modo de fallo es sinónimo de la destrucción del tramo y de la irreversibilidad para cumplir, sin su reconstrucción, los fines del tramo y del dique.

ESPACIO DE SUCESOS DE LOS MODOS DE FALLO: EVOLUCIÓN AVERÍA

Si se proyecta considerando la evolución de la avería de los modos del subsistema y sus posibles interacciones, es habitual declarar que el subsistema falla cuando, al menos, uno de ellos alcanza el nivel de destrucción y con él la irreversibilidad de cumplir los fines del tramo y del dique sin su reconstrucción. En general, el diagrama de los modos principales tendrá una configuración del tipo mixto.

No obstante, el proyecto del dique considerando la evolución de la avería pende directamente de las estrategias de reparación adoptadas y de las decisiones de cuándo y cuánto reparar para minimizar la probabilidad de destrucción del tramo en la vida residual del dique. Este planteamiento se expresa mediante una combinación de, (1) un diagrama de modos de fallo, (2) árboles de desencadenamiento y propagación de la avería, y (3) las posibles estrategias de reparación y la toma de decisiones.

El reparto de la probabilidad conjunta frente a la seguridad y la transformación de modos principales en no principales son dos de los elementos de que dispone el proyectista para diseñar la respuesta de cada subsistema. La optimización técnico-económica y el análisis de sensibilidad son las técnicas para cuantificar la bondad del diseño inicial y de las estrategias de reparación. Los análisis de la rentabilidad financiera y económica, la optimización económica-financiera y el cálculo del nivel de riesgo de la inversión son las herramientas para decidir los costes totales de la inversión.

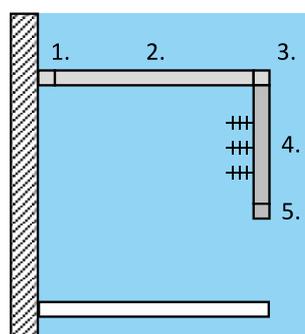
EJEMPLO

JERARQUÍA ESPACIAL EN UN DIQUE DE ABRIGO: TRAMOS, SUBSISTEMAS Y DIAGRAMA DE MODOS DE FALLO

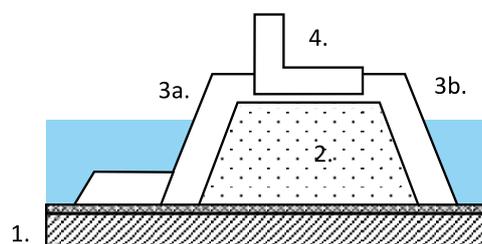
En la figura 3.7 se representa de forma esquemática la disposición en planta de un dique de abrigo, identificando sus tramos, y la sección de la tipología, identificando sus subsistemas.

Se supone que el dique deja de cumplir su función si se produce un fallo en, (a) avería en la alineación principal, o (b) fallo el morro; ambas averías afectan a la operatividad del área portuaria y su acceso. Además, se prevé disponer de medios de construcción para que, una vez iniciado el fallo, se pueda reparar antes de que se alcance la destrucción por lo que no se considera la reconstrucción de ninguno de los dos tramos.

Figura 3.7: Izquierda, esquema de tramos del dique. Derecha, esquema de subsistemas de un tramo



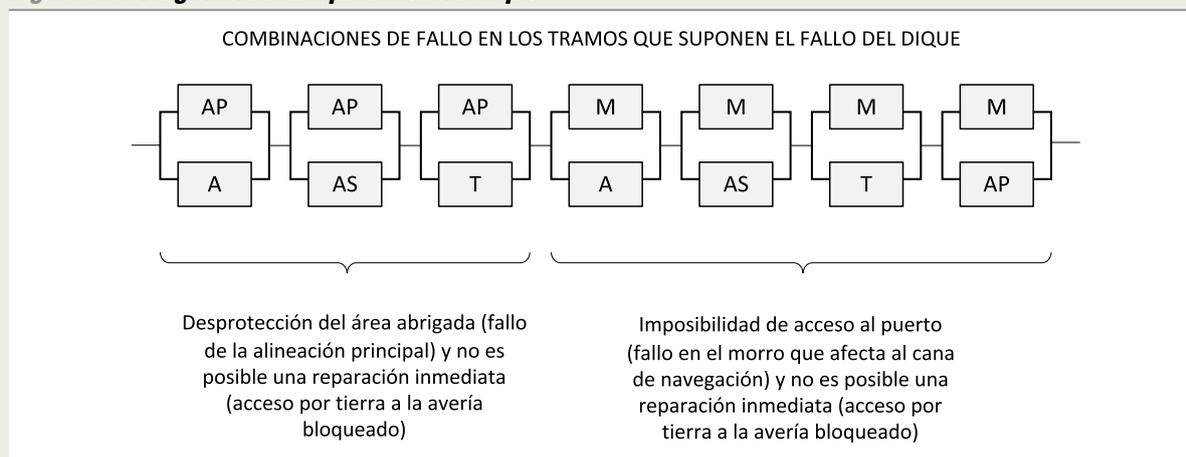
1. Arranque (A)
2. Alineación secundaria (AS)
3. Transición (T)
4. Alineación principal (AP)
5. Morro (M)



1. Interior de la sección (IS)
2. Cimentación y Terreno (CT)
3. Perímetro exterior (PE)
 - a. Barlomar (PEB)
 - b. Sotamar (PES)
4. Superestructura (SE)

La figura 3.8 muestra un diagrama de componentes en los que la alineación principal y el morro cumplen la función de proporcionar abrigo al área portuaria y delimitar el canal de navegación y su navegabilidad; los tramos restantes (arranque, alineación secundaria y transición) tienen como función principal proporcionar el acceso terrestre a los dos tramos que dan abrigo y permitir, en caso de avería, una intervención inmediata. El diagrama de componentes describe esta concepción de la obra, de forma que el dique falla cuando lo hace la alineación principal o el morro y, además, no es posible acceder por tierra para su reparación.

Figura 3.8: Diagrama de componentes del dique

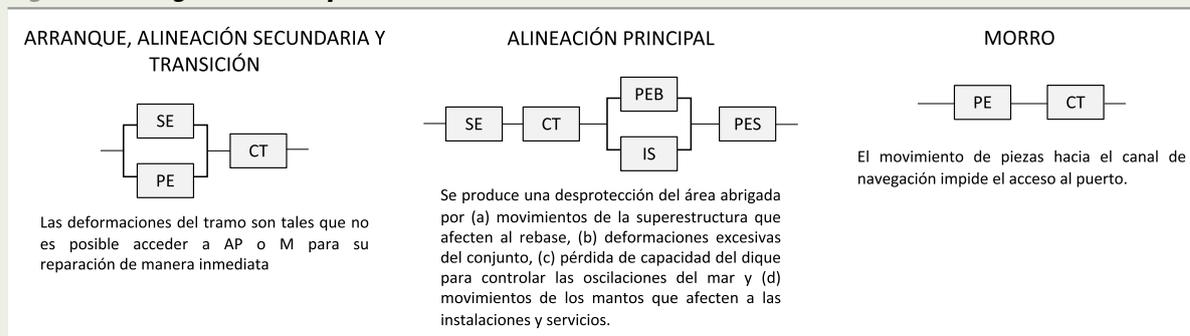


De acuerdo con el espacio de sucesos de los modos de fallo de los tramos y la configuración del diagrama, la notación de cada uno de los fallos de cada tramo indica:

- (a) **Fallo en A/AS/T:** Fallo en el arranque (A), alineación secundaria (AS) o transición (T) que impide el acceso terrestre a la alineación principal (AP) o al Morro (M) y el tiempo es insuficiente para su reparación antes de su destrucción.
- (b) **Fallo en AP:** Fallo en la alineación principal (AP) que desprotege el área abrigada pero se mantiene el acceso terrestre para su reparación antes de su destrucción.
- (c) **Fallo en M:** Fallo en el morro (M) que impide el acceso marítimo al puerto pero se mantiene el acceso terrestre para su reparación antes de su destrucción.

En la figura 3.9 se representan los posibles diagramas de componentes de los distintos tramos del dique. Cada diagrama se ajusta a la definición del fallo descrita por el diagrama de tramos (figura 3.8).

Figura 3.9: Diagrama de componentes de cada tramo



En los tramos arranque, alineación secundaria y transición se produce el fallo cuando no se puede acceder por tierra a la alineación principal (AP) o el morro (M), y el tiempo es insuficiente para su reparación antes de su destrucción. Este estado del dique se puede alcanzar cuando la superestructura y los mantos de protección son inaccesibles, o bien cuando se hayan producido deformaciones excesivas en la cimentación o terreno. De acuerdo con esta concepción, los fallos de cada subsistema tienen los siguientes significados:

- Fallo en SE:** Movimientos en la superestructura (SE) que no permiten la circulación por la alineación principal (AP) o el morro (M), y el tiempo es insuficiente para su reparación antes de su destrucción.
- Fallo en PE:** Deformaciones del perímetro exterior (PE) que no permiten la circulación por la alineación principal (AP) o el morro (M), y el tiempo es insuficiente para su reparación antes de su destrucción, incluso en ausencia de la superestructura.
- Fallo en CT:** Deformaciones, asientos graves o rotura en la cimentación y el terreno (CT) que impiden el acceso terrestre del tráfico rodado a la alineación principal o el morro y el tiempo es insuficiente para su reparación antes de su destrucción.

El fallo en la alineación principal ocurre cuando el área abrigada queda desprotegida pero es posible una intervención inmediata que evite la destrucción del tramo. Esta situación se puede dar con daños en la superestructura con rebase excesivo, en los mantos y en el núcleo que incrementen la transmisión de la energía del oleaje, o por deformaciones excesivas en la cimentación o terreno que afecten al conjunto del tramo. De acuerdo con esta concepción, los fallos de cada subsistema tienen los siguientes significados:

- Fallo en SE:** Daños en la superestructura (SE) que incrementan el rebase.
- Fallo en CT:** Deformaciones, asientos graves o rotura en la cimentación y el terreno (CT) que incrementan la transmisión del oleaje al área abrigada.
- Fallo en PEB-PES/IS:** Daños en el perímetro exterior (PEB-PES) y en el interior de la sección (IS) que incrementan la transmisión del oleaje al área abrigada.
- Fallo en PES:** Desplazamiento de piezas de los mantos del lado de sotamar (PES) que desprotegen las instalaciones y servicios del área abrigada.

El fallo del morro imposibilita el acceso al puerto ya que afecta de forma significativa a la seguridad de la navegación pero es posible una intervención inmediata que evite su destrucción. Se supone que este estado se inicia cuando el desplazamiento de piezas del manto de protección del morro, o cambia su morfología, o se producen deformaciones excesivas en la cimentación o en el terreno que afectan a todo el tramo. De acuerdo con esta concepción, los fallos de cada subsistema tienen los siguientes significados:

- Fallo en PE:** Desplazamiento de piezas del manto de protección o cambios en su morfología (PE) hacia el canal de navegación pero se puede reparar de forma inmediata y evitar la destrucción del tramo.
- Fallo en CT:** Deformaciones y asientos graves en la cimentación y el terreno (CT) pero se puede reparar de forma inmediata y evitar la destrucción del tramo.

3.3.2 Diagramas de componentes frente a la operatividad

Los diagramas frente a la operatividad se elaborarán considerando dos niveles de jerarquía,

- (a) dique y tramos: incluyen los modos de parada operativa en uno o varios tramos del dique directamente relacionados con el diseño del tramo, (tipología y dimensiones) y su finalidad;
- (b) área portuaria y dique: incluyen los modos de parada operativa en el área portuaria directamente relacionados con, (1) la disposición en planta y diseño del dique, o (2) los fallos estructurales y formales en el dique y sus tramos.

Diagramas de modos de parada operativa del dique

Para configurar este diagrama se procede de forma análoga a la propuesta para los diagramas de componentes frente a la seguridad considerando lo siguiente.

Dependiendo de la ubicación de los muelles, del diseño de la bocana y del canal de acceso, y de la dependencia estructural, formal y operativa de los tramos, el diagrama de tramos puede ser en serie o mixto, recogiendo cuando se incumple la operatividad en el dique en cada uno de ellos.

La configuración del diagrama de operatividad solo incluye los subsistemas y los modos de parada relacionados con las actividades efectuadas en cada tramo, al considerar que no están acompañados por un fallo estructural del sistema y que la operatividad se recupera íntegramente, una vez que cesan las causas que provocaron la parada. Cada modo de parada operativa debe describir cómo se produce la parada, el agente o agentes predominantes que intervienen, sus acciones y los valores umbrales, bien de los agentes, bien de sus acciones o respuestas, que determinan si la operatividad queda restringida o hay pérdida total de la misma.

Las relaciones entre los distintos modos de parada se pueden establecer según se puedan considerar mutuamente excluyentes o no y, en este último caso, según sean estadísticamente independientes, o no.

Es habitual declarar que un tramo (o un subsistema) restringe o pierde su operatividad cuando ocurre, al menos uno de sus modos de parada. En ese caso, el diagrama tienen una configuración en serie. En otro caso, la configuración de los diagramas serán posiblemente mixta, con combinaciones de serie y paralelo, representando que la pérdida de operatividad puede ocurrir por la simultaneidad y combinación de varios modos, en uno o varios subsistemas. Para ello, es conveniente elaborar el diagrama de agentes concomitantes y sus valores que influyen en la consecución de los umbrales de parada operativa.

La operatividad del tramo se calcula a partir de la probabilidad de parada de los modos (ordenados por subsistemas), teniendo en cuenta el número de modos y de subsistemas, y si los modos y los subsistemas son mutuamente excluyentes o tienen una relación de dependencia entre ellos.

Diagrama de modos de parada operativa en el área portuaria

El dique abriga de forma diferenciada el área portuaria y sus diferentes infraestructuras e instalaciones. La disposición y diseño de la forma en planta y tipología del dique se determina en función de los objetivos de operatividad en el área portuaria. A tal efecto, es conveniente que el área portuaria se ordene por subáreas portuarias (canal de navegación, zona de maniobra y fondeo, muelles, etc.), y que, en cada una de ellas, se especifiquen los requisitos de proyecto frente a la operatividad.

En general, el incumplimiento de estos requisitos en cada una de las subáreas portuarias se recoge en modos de parada operativa. Es habitual declarar que la subárea restringe o pierde su operatividad cuando ocurre al menos uno de los modos de parada. En ese caso, la configuración de la subárea es un diagrama en serie. En otro caso, los diagramas serán mixtos, combinaciones de serie y paralelo, indicando que la pérdida local de operatividad puede ocurrir por la simultaneidad y combinación de varios modos en la subárea. Para ello, es conveniente elaborar el diagrama de agentes concomitantes y sus valores que influyen en la consecución de los umbrales de parada operativa.

Este esquema de trabajo se puede aplicar para elaborar los diagramas de modos de pérdida global de operatividad del área portuaria en función de la operatividad en cada una de las subáreas y considerando, para cada una de ellas, los diagramas de los posibles incumplimientos de la operatividad.

COMENTARIO

DIAGRAMAS DE COMPONENTES EN OTROS TEXTOS TÉCNICOS

En algunos textos técnicos, p. ej. [PIANC, \(2016\)](#), se utiliza el concepto de “árbol de fallo” para describir cuándo y cómo falla un subsistema. Este “árbol” representa sólo una posible configuración de cómo falla el dique e incluye si cada modo de fallo es suficiente para producir el fallo (OR) o si debe ser simultáneo con otro u otros modos de fallo (AND). Nótese que, aunque en general se emplean para caracterizar situaciones de pérdida de la seguridad, su uso es extensible a situaciones de pérdida de operatividad. A pesar de su nomenclatura éstos no guardan relación con los árboles descritos en los Artículos 2.6 y 3.7, sino con los diagramas de componentes.

En las siguientes figuras se muestran, a modo de ejemplo, dos “árboles de fallo” representados según [PIANC, \(2016\)](#) y los diagramas de componentes equivalentes según esta ROM. La primera (figura 3.10) muestra una posible configuración de condiciones de fallo que pueden provocar una excesiva transmisión del oleaje en un dique en talud con espaldón. La segunda (figura 3.11) muestra una posible configuración de condiciones de fallo que pueden provocar un exceso de rebase en un dique vertical.

Figura 3.10: “Árbol de fallo” (PIANC, 2016) y diagrama de componentes equivalente para excesiva transmisión del oleaje en un dique en talud con espaldón (ROM 1.1-18)

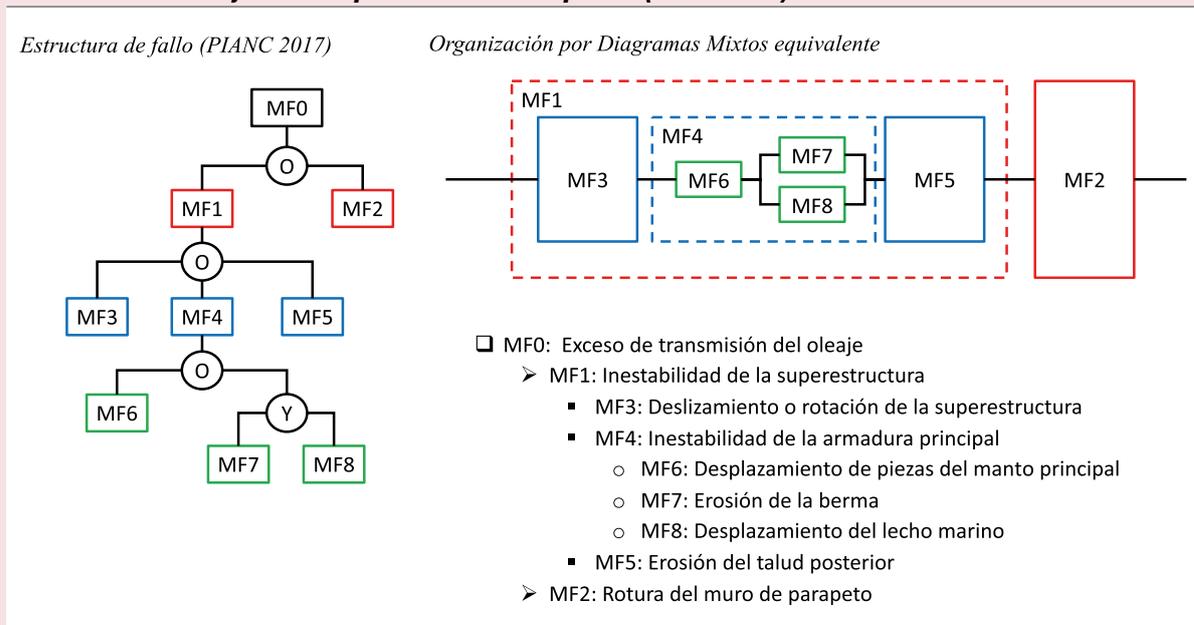
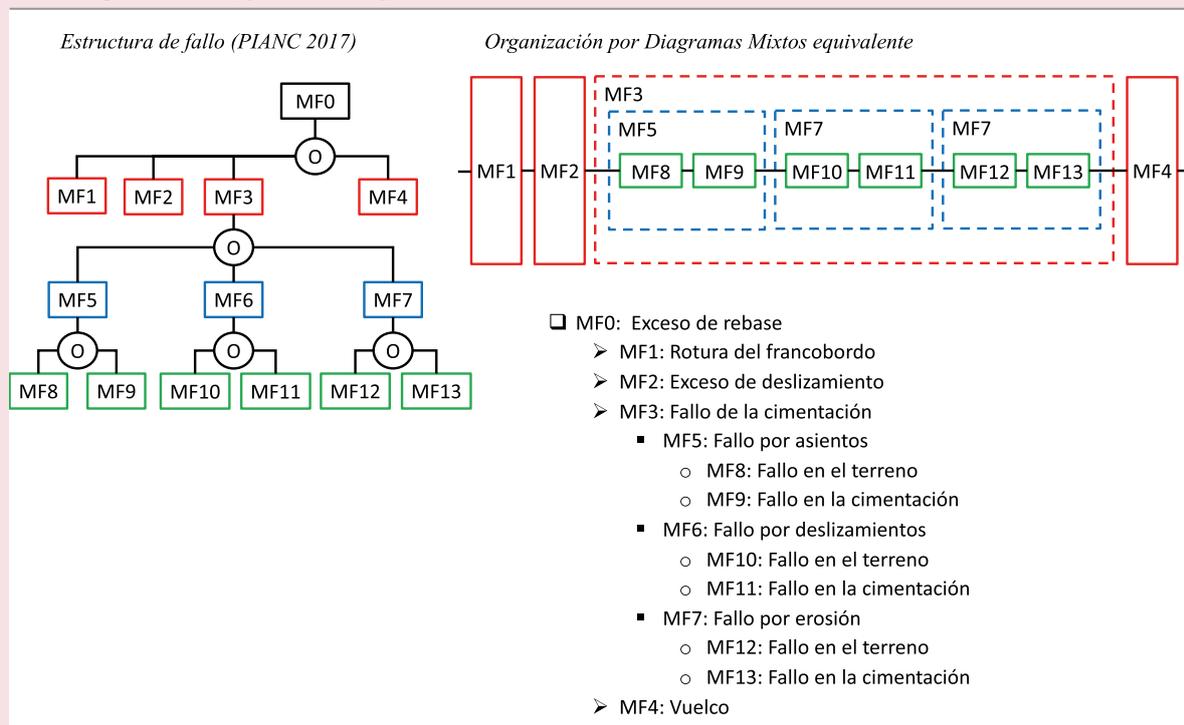


Figura 3.11: “Árbol de fallo” (PIANC, 2016) y diagrama de componentes equivalente para excesivo rebase en un dique vertical, (ROM 1.1-18)

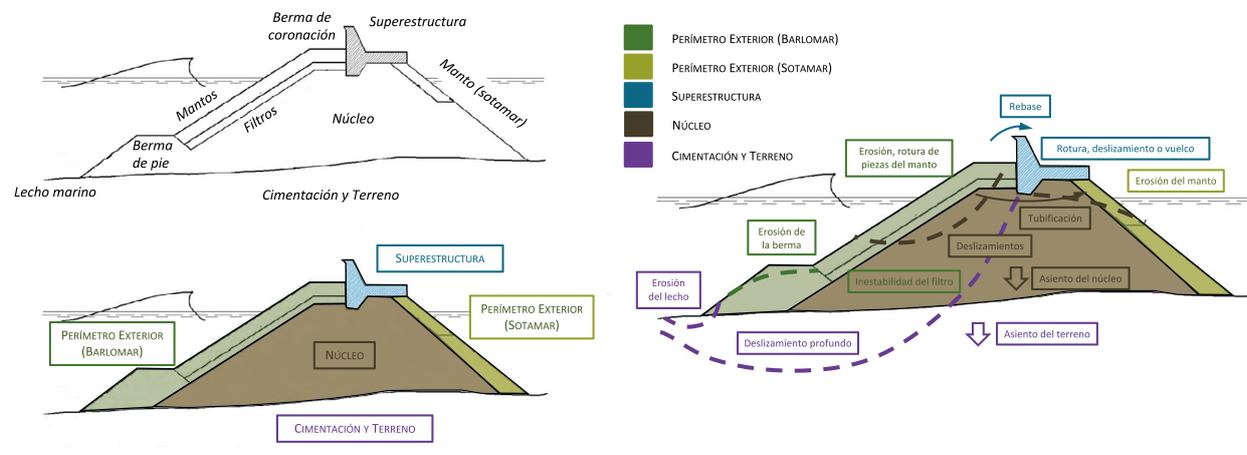


3.4 MODOS PRINCIPALES DE FALLO Y DE PARADA EN UN DIQUE DE ABRIGO

Los modos de fallo y de parada describen los mecanismos que conducen a la reducción de la fiabilidad (pérdida de seguridad) y de la operatividad de la obra o de sus componentes, respectivamente. El inicio y la evolución del fallo se manifiestan por cambios de forma o de la capacidad resistente de la estructura que alteran su comportamiento frente al oleaje incidente y otros agentes climáticos, atmosféricos y marítimos, los agentes de uso y explotación y el comportamiento del terreno. Además, estas alteraciones pueden afectar la capacidad de la infraestructura de abrigar el área portuaria, condicionando o impidiendo las actividades que se desarrollan en ella. El cálculo de la probabilidad conjunta de fallo, la operatividad y sus consecuencias permite estimar los costes totales de la inversión y su nivel de riesgo.

En los siguientes Artículos se resumen los modos de fallo principales que deben considerarse en cada uno de los tramos y subsistemas del dique (tanto en la vida útil como en otras fases de proyecto), sin perjuicio de que, algunos de ellos, puedan declararse como no principales atendiendo a reglas de buena práctica y otras recomendaciones, figura 3.12.

Figura 3.12: Principales elementos y modos agrupados por subsistemas en un dique en talud (imagen adaptada de Burcharth, 1992)



3.4.1 Tramo con alineación recta

La batimetría, conjuntamente con la anchura y orientación de la bocana, las características del oleaje en el interior del área portuaria y la flota determinan la traza del dique, el área de fondeo y maniobra y la disposición en planta de muelles y atraques.

En general, la alineación principal del dique se orienta perpendicularmente a la dirección de propagación del oleaje dominante (mayor contenido energético), y/o predominante (más frecuente). Apoyándose en el análisis 2DH, se calculará la variabilidad longitudinal de los agentes y sus acciones a barlomar y sotamar debido a la interacción de la energía irradiada desde los bordes de la alineación principal, en general morro y cambio de alineación, y la energía reflejada por la sección.

La zona abrigada del área portuaria suele ubicarse a una distancia mínima de la bocana del orden de tres a cinco longitudes de onda correspondiente al periodo característico del oleaje predominante. Si la longitud de la alineación principal o su orientación son inadecuadas se condicionan los requisitos de operatividad del área portuaria. En estos casos, se debe analizar el cierre temporal del puerto y determinar los valores umbrales y su probabilidad de excedencia.

Si se prevé dragar el área portuaria, se tendrá en cuenta que la longitud de onda es función de la profundidad y que, además, los cambios bruscos de batimetría cambian la dirección de propagación (refracción), reflejan la energía del tren incidente, alterando significativamente los patrones oscilatorios de diseño del área portuaria.

Modos principales de fallo en cada subsistema: Análisis 2DV

Los resultados de los trabajos anteriores son el punto de partida para determinar la sección o secciones críticas de la alineación principal y el conjunto completo de sus modos de fallo principales, análisis 2DV. El proyectista completará este listado de modos principales en función de las particularidades del oleaje local, la tipología y los materiales disponibles y los procesos de construcción, el terreno y la batimetría. En ese caso es conveniente ubicar los modos de fallo adicionales en uno de los subsistemas o identificar uno específico para ellos. Entre otros, se considerarán los siguientes modos principales de fallo organizados por subsistemas.

PERÍMETRO EXTERIOR DE LA SECCIÓN

Estos modos se ordenarán según el lado de la sección en el que se localizan: lado mar y coronación (barlomar) y lado tierra (sotamar).

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

A barlomar, los modos describirán la respuesta del lecho en el frente del dique y del cuerpo central y la superestructura frente a los agentes climáticos. A priori, y con carácter general serán modos principales,

- (a) cambios de profundidad del lecho en el frente del dique, erosión/acumulación y formación de barras,
- (b) cambio de la geometría de las bermas de pie y coronación, por pérdida de piezas o cambios de forma del lecho y terreno,
- (c) en su caso, cambio de la geometría por erosión del manto principal (por ejemplo, debido a pérdida de piezas, deslizamiento, adoquinamiento, compactación heterogénea, etc.) o deformaciones del núcleo y terreno,
- (d) pérdida de equilibrio estático de la estructura o superestructura,
- (e) hundimiento, plastificación local y vuelco plástico de la estructura o superestructura,
- (f) transmisión de las oscilaciones del mar por rebase por la coronación, siempre que implique un fallo en una instalación principal.

A sotamar, los modos principales describirán:

- (a) cambios de forma en el lecho: erosión/acumulación y formación de barras y licuefacción,
- (b) cambio de la geometría del manto de protección por pérdida de piezas u otras causas,
- (c) deslizamiento del manto causado por los agentes climáticos y de uso y explotación, (maniobras del buque), y, en su caso, pérdida de piezas por rebase o por la transmisión del oleaje,
- (d) pérdida de la estabilidad de la berma, del manto principal y el espaldón.

INTERIOR DE LA SECCIÓN

Se incluirán todos los modos relacionados con alteraciones geométricas, (acumulativas), y deformaciones, (excesivas), de los rellenos granulares debido a la acción de los agentes climáticos entre ellos,

- (a) deformación y deslizamiento de mantos secundarios,
- (b) pérdida de capacidad portante, deformabilidad y pérdida de la estabilidad del núcleo,
- (c) pérdida de la condición filtro de las capas destinadas a este propósito,
- (d) transmisión de las oscilaciones del mar a través,
- (e) licuefacción y socavación por efecto de las olas propagándose desde el morro y/o por efecto de otros agentes, entre ellos los buques o las hélices de los buques navegando o atracando.

Estos modos podrán ser verificados como no principales, siempre que se apliquen normas de buena práctica, tanto en el diseño como en la construcción del dique y se ajusten a lo recomendado en la ROM 0.5-05, y en los Anejos de esta ROM I.1-18.

No obstante, los modos cuya ocurrencia puedan provocar otros modos de fallo, p. ej., el hundimiento de la superestructura y las variaciones en la geometría del tramo con consecuencias en su comportamiento hidrodinámico se considerarán, a priori, modos principales.

CIMENTACIÓN Y TERRENO

Se incluirán los modos asociados al comportamiento conjunto de la cimentación, la banqueta de enrase, el relleno granular y el terreno. A priori, siempre que proceda, serán modos principales,

- (a) licuefacción,
- (b) pérdida de capacidad portante y deformabilidad del terreno,
- (c) pérdida de la estabilidad global del conjunto terreno-estructura.

Algunos de estos modos podrán ser verificados como no principales, siempre que se apliquen normas de buena práctica, tanto en el diseño como en la construcción del dique y se ajuste a lo recomendado en la ROM 0.5-05. No

obstante, los modos cuya ocurrencia puedan provocar otros modos de fallo con consecuencias en el comportamiento hidrodinámico de la sección y del terreno, se considerarán, a priori, modos principales.

ELEMENTOS DE PROTECCIÓN, ESTRUCTURALES Y MATERIALES DE RELLENO

En elementos de protección tales como piezas naturales y artificiales de hormigón en masa, a priori serán modos principales,

- (a) rotura de la pieza en trozos,
- (b) agotamiento resistente de la sección,
- (c) pérdida de durabilidad (deterioro progresivo estructural, formal, estético, etc).

En los elementos construidos con hormigón en masa y armado, además de los anteriores, se verificarán los modos obligados por las normas de cada país que, en el caso de España, es la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), pudiendo asumirse, en este caso, que son modos no principales.

Para los materiales de relleno y el resto de materiales los modos principales serán, a priori, su degradación y la pérdida de durabilidad a lo largo de la vida útil. Se podrán transformar en modos no principales siempre que se compruebe que satisfacen las especificaciones técnicas relacionadas con un comportamiento admisible en el medio marino frente a la degradación y la durabilidad. En este caso, es recomendable especificar los métodos de inspección y auscultación y el valor umbral de los indicadores del progreso del fallo, para delimitar cuándo y cómo se debe actuar y minimizar sus consecuencias.

Tramos rectos con incidencia oblicua del oleaje: Análisis 3D

Se tomarán los subsistemas descritos en el análisis 2DV, y, en cada uno de ellos, se considerará el comportamiento del tramo con la incidencia oblicua dispuesta en cinco sectores, (véase el Comentario posterior), (a) normal, (b) oblicua, (c) muy oblicua, (d) sector de Wreber y (e) cuasi paralelo a la traza del dique. En cada uno de ellos, se analizará los modos de fallo teniendo en cuenta su comportamiento específico debido a la oblicuidad del sector correspondiente.

Cuando el ángulo de incidencia se encuentra en:

- ◆ **Sector (a):** con el estado del arte actual, se puede admitir que el comportamiento de la sección es análogo al de la incidencia normal. No obstante, se debe analizar las condiciones de rotura y la evolución de presiones (fases impulsiva y reflejante) contra la pared vertical o superestructura. En su caso, se reducirá el ángulo del sector, por ejemplo (-10° a 1°), para ajustarse a la hipótesis de trabajo considerada para el sector normal. Los restantes sectores se adecuarán a esta circunstancia.
- ◆ **Sectores (b) y (c):** el remonte y el retorno de agua puede producirse de forma localizada en zonas separadas entre sí una distancia proporcional a la longitud de onda a pie de dique, dependiendo de la tipología y pendiente del dique, del periodo y del ángulo de incidencia del oleaje. En estas zonas se incrementa significativamente, (1) la velocidad del agua y sus gradientes espacial y temporal y, en consecuencia, (2) las fuerzas de arrastre e inercia en los elementos granulares y espaldón o superestructura y (3) el caudal de rebase. En estas condiciones de oblicuidad no es conveniente proyectar un cambio brusco de la sección o de la tipología ya que, a su alrededor, es posible que haya un incremento de la altura de ola y/o canalice del flujo de retorno. En todos los casos se debe evitar que el cambio coincida con una zona de retorno de agua asociada a la incidencia oblicua.
- ◆ **Sector (e):** se evaluará de forma específica el comportamiento del dique cuando el ángulo de incidencia supere, aproximadamente, los 65° . En este caso, (1) el dique actúa como la pared de un canal; (2) el tren de ondas se propaga a lo largo de la alineación del tramo; (3) las fuerzas de arrastre e inercia y los empujes son máximos alrededor del nivel medio del mar y decrecen con la profundidad. La estructura granular de protección del perímetro exterior e interior no está concebida para trabajar frente a las acciones de un tren de ondas que se propaga a lo largo del tramo. Una vez iniciado el fallo, algunos elementos reducen o pierden el apoyo de los contiguos, y su extracción ya sólo depende de la persistencia de los agentes climáticos sin

necesidad de incrementar significativamente la altura de ola. Este comportamiento de la evolución temporal de la avería se puede representar por una curva de iso-duración tipo escalón o por una sigmoide cuya parte central es aproximadamente vertical, figura 2.8.

Asimismo se tendrá en cuenta que en diques en los que domina la reflexión, (p. ej. verticales o mixtos con espaldón cimentado por debajo del nivel del mar),

- ◆ los mayores empujes horizontales se producen para ángulos de incidencia en el sector (-15° a 15°), en vez de para incidencia normal;
- ◆ cuando el ángulo de incidencia supera, aproximadamente, los 65° , el régimen de presiones sobre el espaldón y la superestructura es aproximadamente hidrostático, y
- ◆ si el dique dispone de una berma o un talud protegiendo el cuerpo central o la superestructura se debe comprobar que el ángulo de incidencia del oleaje en la pared es, o no, el mismo que el correspondiente a pie del dique ya que la refracción del frente puede ser significativa.

COMENTARIO

En general, se pueden distinguir cinco sectores de incidencia del oleaje:

- (a) normal, (-15° a 15°),
- (b) oblicua, (15° a 35°),
- (c) muy oblicua, (35° a 55°),
- (d) sector de Wreber, (55° a 65°),
- (e) cuasi paralela a la traza del dique, ($> 65^\circ$).

El módulo del coeficiente de reflexión mínimo con fase nula a pie de dique ocurre en el sector de Wreber (55° a 65°), dependiendo de las características no lineales del tren incidente y de la tipología. Este sector separa, aproximadamente, los ángulos de incidencia sin y con “ola corredera”. La extensión espacial, perpendicular al dique, de la onda corredera crece con el ángulo de incidencia ($> 65^\circ$), siendo, teóricamente infinita, para una incidencia paralela, (90°), a un dique (en la hipótesis de tramo de longitud infinita).

3.4.2 Tramos con alineaciones no rectas y transiciones

Se incluyen en estos tramos el morro, los cambios de alineación, las transiciones y el arranque. Para iniciar la selección se considerarán los mismos modos principales de fallo correspondientes al tramo con alineación recta organizados en los mismos subsistemas.

No obstante, e independientemente de la incidencia del oleaje, algunos modos de fallo tienen en estos tramos una evolución espacio-temporal distinta a la reconocida en una alineación recta. En general, esto ocurre por una de las dos razones siguientes, (a) la interacción del oleaje con el tramo provoca la convergencia-divergencia del flujo de energía ascendente, (b) la respuesta de la sección depende del apoyo lateral que pueda recibir.

Para considerar la primera razón es necesario verificar que la transformación del oleaje en el tramo es brusca, es decir, que no hay longitud suficiente, l ($l > 1.5L$) para que se produzcan efectos no lineales; L es la longitud de onda a pie de dique. En estas condiciones, la altura de ola se puede cuantificar aplicando la teoría lineal del oleaje y la hipótesis de conservación de flujo de energía entre dos ortogonales. En otro caso será necesario aplicar modelos no-lineales de transformación del oleaje para calcular la variación de la altura de ola, (y de los procesos dependientes de ella, remonte y descenso, rebase, presión sobre el espaldón, etc.), que produce la convergencia-divergencia del flujo de energía.

Una manera simple de identificar la relevancia del apoyo lateral en el desencadenamiento del modo es comparar la geometría y la disposición de los elementos de la alineación recta con las de la alineación no recta o transición. En aquella el comportamiento hidrodinámico del oleaje, su acción y la respuesta del dique se supone “plana o bidimensional”, de tal forma que cualquier parte o elemento del tramo cuenta con el apoyo lateral necesario y suficiente para que el fallo se produzca, “mayoritariamente” en el plano 2DV. En este caso, la variación transversal del fallo se debe

más a las “condiciones geométrica de la avería” que a un cambio del comportamiento hidrodinámico del oleaje y de la respuesta del dique.

Si no hay apoyo lateral, o está condicionado, la respuesta del elemento no será plana, y una vez iniciada la avería, ésta evoluciona sin solución de continuidad hasta la destrucción sin necesidad de incrementar la altura de ola, (función escalón o sigmoide entre altura de ola y el nivel de daño, figura 2.8).

En estos casos se debe optar por dimensionar el elemento: (a) a inicio de avería, (b) a evolución de daño pero asegurando la capacidad de intervención inmediata en función del carácter del tramo, o (3) como modo no principal.

Morro

La respuesta del morro frente a la acción de los agentes climáticos y terreno depende principalmente de su conexión con el resto del dique, tipología y geometría, (radio relativo y talud), y de las características del oleaje incidente. En función de la transformación del oleaje por su interacción con el morro y el dique, se considerarán al menos los siguientes modos de fallo y de parada específicos.

PERÍMETRO RADIAL DEL MORRO

Los modos podrán ocurrir en cualquier localización del tramo, lado mar y coronación (barlomar) y del lado tierra (sotamar) dependiendo del ángulo de incidencia del oleaje. En este subsistema se incluirán los modos que describen la respuesta del lecho, del cuerpo central y de la superestructura frente a los agentes climáticos en el perímetro radial del morro.

Se analizará su evolución espacio-temporal, en particular su zona de inicio y su sentido de progresión teniendo en cuenta el comportamiento tridimensional del oleaje (convergencia-divergencia) y del sistema estructural. A tal efecto, es conveniente describir geoméricamente el morro por sectores circulares que sean espacialmente homogéneos con respecto al comportamiento del oleaje y la respuesta estructural. En algunos casos, será conveniente particularizar la descripción espaciotemporal de cada uno de los sectores en los que se organiza la incidencia oblicua del oleaje.

A priori, y con carácter general serán modos principales,

- (a) erosión del manto y cambios de geometría del morro en los diferentes sectores circulares establecidos en su geometría,
- (b) erosión de la berma de pie, cimentación y del lecho en el perímetro del morro (exterior e interior),
- (c) en su caso, pérdida de estabilidad global del espaldón o de la superestructura,
- (d) erosión y deformación de taludes interiores por propagación de la energía del oleaje por la bocana.

INTERIOR DEL MORRO

Se incluirán todos los modos relacionados con alteraciones geométricas (acumulativas), y deformaciones (excesivas), de los rellenos granulares debidos a la acción de los agentes climáticos siguiendo el esquema dispuesto para el tramo con alineación recta.

CIMENTACIÓN Y TERRENO DEL MORRO

Se incluirán los modos asociados al comportamiento conjunto de la cimentación, la banqueta de enrase, el relleno granular y el terreno, siguiendo el esquema dispuesto para el tramo con alineación recta. En el caso de morros de tipología vertical o mixta y de tipología en talud con superestructura, se debe tener en cuenta que no tiene, del lado del canal, la contribución lateral de las otras secciones del tramo y, además, soporta directamente la acción (alternante) asociada a los cambios espacio-temporales de las aceleraciones y presiones provocadas con

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

el paso de cada ola. En general, para diques de IRE e ISA altos es recomendable ensayar la estabilidad del morro a la escala adecuada (1 : 40 o menor) e incluyendo en el modelo la alineación principal o, al menos, una longitud significativa de ella que represente los procesos de radiación desde el morro y su interacción con ella.

ELEMENTOS DE PROTECCIÓN, ESTRUCTURALES Y MATERIALES DE RELLENO

En elementos de protección tales como piezas naturales y artificiales de hormigón en masa se incluyen, entre otros, los siguientes modos,

- (a) rotura de la pieza en trozos,
- (b) agotamiento resistente de la sección,
- (c) pérdida de durabilidad (deterioro progresivo estructural, formal, estético, etc),
- (d) desplazamiento de los elementos estructurales o trozos y materiales de relleno al canal de navegación y área portuaria.

En el morro, además de los modos de fallo anteriores es necesario considerar un nuevo modo de fallo, desplazamiento de algunos elementos del morro con consecuencias en la seguridad de la navegación.

Cambios de alineación y transiciones

La interacción del oleaje incidente con cambios de alineación del dique y con las transiciones de tramos se concreta en la refracción (convergencia), y asomeramiento del frente de ola y, posiblemente, la radiación longitudinal de la energía del oleaje incidente.

Se analizará la variación de la altura de ola y el ángulo de incidencia en el perímetro exterior del tramo y a lo largo del tramo, se cuantificará la cinemática y dinámica de la lámina de agua, se consideran, entre otros, los siguientes modos de fallo,

- (a) erosión de los mantos, berma de pie y de coronación y espaldón,
- (b) transmisión de la energía del oleaje a través de la sección y por rebase y estabilidad de la infraestructura interior.

Arranque y alineación secundaria

El arranque del dique es la unión del dique con tierra u otro dique ya existente y constituye el borde de la alineación secundaria. Suele ubicarse en zonas someras donde se puede producir la rotura del oleaje y son relevantes los siguientes procesos,

- ◆ variación del nivel medio del mar,
- ◆ generación de corrientes longitudinales y de retorno en la zona de rompientes, y
- ◆ los procesos de transporte de sedimentos.

El ángulo de incidencia y la altura de ola dependen de la configuración del fondo y su naturaleza y de la alineación secundaria que determina la zona de entronque y la ubicación espacial del arranque. Por lo general la incidencia del oleaje en estos dos tramos suele ser muy oblicua o cuasi paralela a su traza. Para otros sectores de incidencia es necesaria analizar la reflexión de los trenes de ola en el dique, en particular su propagación hacia la costa, refracción-asomeramiento, interacción con el tren incidente y rotura, y la circulación litoral asociada, o hacia el mar con refracción inversa (uno de los mecanismos de generación de corrientes de retorno es la interacción estacionaria de trenes de onda con incidencia oblicua).

La selección de los modos principales de fallo de los tramos se ajustará a lo dispuesto para la alineación recta. Además, se cuantificará la interacción del oleaje (teniendo en cuenta los diferentes sectores de incidencia) con la alineación secundaria, el arranque y la línea de costa adyacente y se verificará,

- (a) erosión (socavación) y acumulación de sedimentos en ambos tramos,
- (b) variación espacio-temporal de la batimetría y de la línea de costa en el litoral adyacente.

3.4.3 Modos principales provocados por otros agentes en el emplazamiento

En este Artículo se consideran modos principales frente a la seguridad, causados por otros agentes climáticos y sísmicos que, en algunas ubicaciones, pueden ser predominantes y condicionar el Proyecto de Inversión.

Por movimientos sísmicos

Se determinarán los modos de fallo a partir de un análisis del comportamiento del sistema suelo-agua-estructura frente al agente sísmico. La magnitud del sismo se determinará aplicando los métodos probabilistas considerados en la determinación de los agentes climáticos. Se tendrá en cuenta que, con algunas excepciones, en las costas peninsulares e insulares españolas el agente sísmico está asociado a una condición de trabajo excepcional.

Se considerarán modos principales frente al sismo, entre otros, la licuefacción del terreno y el deslizamiento de los diferentes elementos del tramo.

Por maremotos y meteomaremotos

Los maremotos de origen sísmico o por deslizamiento y los meteomaremotos de origen meteorológico se incluirán en el análisis estadístico de los agentes climáticos, en particular en la determinación de las variaciones del nivel medio del mar con periodos superiores a los cinco minutos, diferenciadas de aquellas debidas a los grupos de olas. En su caso se considerarán todos los modos de fallo incluidos en el Artículo 3.4.1 para los tramos rectos y para las alineaciones no rectas y transiciones, Artículo 3.4.2.

3.4.4 Modos en las fases de construcción, conservación y reparación

En estas fases de proyecto, los modos de fallo dependen del proceso y del método constructivo, así como de su secuencia temporal. En cada caso, los modos de fallo se determinarán a partir del análisis del comportamiento de la interacción de los diferentes estados de la obra y los agentes climáticos. En función de ellos se definirán los tramos del dique y, para cada uno de ellos, los posibles subsistemas en los que se agrupan los modos de fallo y de parada.

Si se prevé la parada de la obra en periodos invernales, o por otra causa, se debe,

- (a) proyectar la estructura de protección de los tramos no finalizados (mota o morro de internada),
- (b) describir los modos de fallo de dicha estructura y su evolución espacio-temporal, y
- (c) verificar que se cumplen los requisitos previstos en el proyecto para las paradas constructivas.

La ocurrencia de estos modos deberá incluirse en la oferta técnica y económica de la construcción, acotando su probabilidad y cuantificando sus consecuencias en todos sus ámbitos.

3.4.5 Modos de parada relacionados con las actividades del área portuaria

Serán modos principales de parada operativa los relacionados con la transformación de las oscilaciones del mar, principalmente oleaje, la modificación de la circulación general de agua y del aire, la variación de la batimetría y de la línea de costa por la presencia del dique y en cada uno de los tramos. Entre ellos se considerarán,

- (a) las oscilaciones del mar, corrientes y velocidad de viento excesivas en canal de acceso, bocana, zona de maniobra y muelles,

- (b) las oscilaciones del mar excesivas por transmisión y rebase a sotamar del tramo (muelle, grúa, camino de rodadura, etc.), o a la zona de tierra (accesos, almacenes, etc.) y entorno del arranque del dique.

En fondos móviles (fango, arena, grava), la profundidad a barlomar del dique está gobernada por los procesos de transformación de la energía del oleaje por la presencia del dique, en particular por la formación y desarrollo de barras de acumulación y senos de erosión. Estos procesos se manifiestan en diferentes tramos del dique y zonas relevantes del área portuaria, pudiendo alterar, de forma brusca, la pendiente del fondo y su profundidad. Entre ellos se considerarán,

- (a) variaciones bruscas del fondo en la traza del dique, a barlomar y sotamar,
- (b) acumulaciones progresivas de sedimentos en canal de acceso, bocana, área de maniobra y muelles.

3.5 REPARTO DE LA PROBABILIDAD CONJUNTA DE FALLO Y PARADA EN EL TRAMO

El reparto de la probabilidad conjunta de fallo (o de parada) es el proceso de asignar valores a la fiabilidad (o a la operatividad) de los modos principales de fallo (o de parada) en un tramo de dique. Debe de realizarse en términos de su razón y ser estructural y formal, de su comportamiento frente a los agentes y de los condicionantes de proyecto. Forma parte de la concepción, diseño y dimensionamiento del dique y sus tramos y de la selección de los modos principales, no principales y los sujetos a verificación obligada por Códigos, Instrucciones y otras normativas.

Con carácter general, la asignación, o no, de una parte de la probabilidad conjunta de fallo a un modo (consideración de modo principal) se basa en los siguientes criterios:

- (a) su dominio espacio-temporal se estructura en torno al tramo y a la fase de proyecto,
- (b) depende de si el diseño es ELU o ELS, (véase Artículo 2.5),
- (c) se apoya en las relaciones expresadas en los diagramas de componentes y los árboles de desencadenamiento y propagación entre modos y las estrategias de reparación,
- (d) la probabilidad de fallo asignada a cada uno de los modos principales de fallo que comparten el mismo agente predominante y se dimensionan a inicio de avería con el mismo valor del agente, se computa una sola vez; no así sus consecuencias que se deben calcular de forma específica para cada uno de ellos considerando la simultaneidad de su presentación,
- (e) se ajusta a lo dispuesto en el apartado 2.5.3, ecuaciones 2.45 y 2.46, de la ROM 1.0-09, que acotan la probabilidad conjunta entre unos límites inferior y superior.

El reparto de la probabilidad es un proceso iterativo y se extiende a lo largo de los sucesivos grados de desarrollo del proyecto,

1. se inicia con el reparto a priori de la probabilidad conjunta de fallo, (o de parada), entre los modos principales, según se describe en el apartado 2.5.4.3 de la ROM 1.0-09,
2. se verifica en el Estudio de Alternativas y de Soluciones,
3. se delimita con la optimización económico-financiera del Proyecto de Inversión,
4. se decide en la optimización técnico-económica del coste total del dique en su ciclo vital, durante la elaboración del Anteproyecto y del Proyecto de Construcción.

La coordinación entre la optimización técnico-económica y la económico-financiera y sus respectivos análisis de sensibilidad se discuten en la Sección 5 de esta ROM 1.1-18.

3.5.1 Selección de modos principales y no principales

Además de lo comentado en el Artículo anterior, la selección de los modos principales que contribuyen a la probabilidad conjunta de fallo se apoya en, (I) la evaluación de las consecuencias de la ocurrencia del modo, en gene-

ral, (2) los costes de construcción, conservación y reparación y (3) en el análisis de las consecuencias económicas y sociales y ambientales si se produce el fallo o la parada. El conjunto de modos principales se formará teniendo en cuenta la optimización técnico-económica del coste total del dique y de sus tramos en su ciclo vital.

Un modo principal se podrá declarar no principal cuando sea posible reducir su probabilidad de ocurrencia (o su nivel de riesgo) a valores despreciables con ligeros incrementos de (a) la geometría o (b) las propiedades mecánicas del elemento o parte del tramo, sin cambios significativos en su coste.

Para los diques de abrigo, el umbral de la contribución significativa a la probabilidad de fallo o parada se establece en 10^{-4} . Cualquier modo cuya probabilidad de ocurrencia esté por debajo de dicho umbral podrá considerarse como no principal.

Modos a verificar por otros Códigos, Instrucciones y Recomendaciones

Cuando una Instrucción o Norma sea de obligado cumplimiento, la verificación del modo afectado se ajustará a lo dispuesto en aquellas.

Si la norma es determinista, se admitirá que el modo no contribuye ni a la probabilidad conjunta de fallo o de parada operativa, ni al nivel de riesgo del tramo en la vida útil de la infraestructura. No obstante, si el agente predominante es aleatorio, (p. ej. el oleaje), la probabilidad del excedencia de su valor de diseño debe ser igual o inferior a 10^{-4} , admitiendo que dicha probabilidad es representativa de la probabilidad de ocurrencia del modo. En otro caso, deberá considerarse como modo principal o susceptible de transformarse en un modo no principal.

3.6 ÁRBOLES DE DESENCADENAMIENTO Y PROPAGACIÓN DEL FALLO O PARADA

Si el dique se diseña teniendo en cuenta la evolución espacio-temporal de los modos de fallo y de parada y sus interacciones, es necesario analizar y definir cuándo y cómo se desencadena el fallo (o la parada) y cómo afecta a la evolución espacio-temporal de la avería por tramos, subsistemas o modos.

Cada árbol representa una secuencia encadenada del incumplimiento de los objetivos de proyecto. Sus ramas conectan modos de fallo (o parada). El nodo es un punto de encuentro de líneas, ramas, con origen y destino en otros modos. En cada nodo se especifica el nivel de avería que lo desencadena (por medio de valores umbrales de los agentes, acciones o respuestas), y las posibles opciones que ofrece el diseño para decidir sobre la oportunidad, o no, y la magnitud de su reparación. Ésta es la información necesaria para analizar estrategias de reparación y tomar decisiones.

Es conveniente elaborar los árboles de desencadenamiento para cada una de las tres condiciones de trabajo del dique y sus tramos: operativas normales, extremas y excepcionales. En el primer caso el árbol se desarrolla en función de los modos de parada operativa y los niveles de operatividad, (plena, restringida o cancelada). Para las condiciones de trabajo extremas el árbol se desarrolla mediante los modos de fallo principales y una posible evolución espacio-temporal de las averías, de acuerdo con el diagrama de modos.

Finalmente, en algunos casos puede ser conveniente elaborar el árbol de desencadenamiento y propagación de modos en condiciones de trabajo excepcionales, y analizar el posible colapso progresivo del dique, en uno o varios tramos y en uno o varios subsistemas, simultáneamente y las condiciones de post-excepcionales operativas y extremas que se describen en el Capítulo 4 de la ROM 0.0-01. En España, en general, se incluyen en estas condiciones los modos de fallo provocados por los agentes sísmicos y el maremoto (agente climático marítimo).

En esta ROM 1.1-18 se analizan las condiciones excepcionales fortuitas, en la Sección 5, Artículo 5.6, por origen natural, error humano, fallo del sistema, etc, formulado desde la imposibilidad de garantizar el riesgo cero, cuantificando los índices de accidentalidad y la aceptación social de la diferencia entre lo que es un hecho asumible o, necesariamente, evitable.

3.6.1 Diseño frente a la seguridad (condiciones de trabajo extremas)

Los árboles se podrán elaborar considerando el conjunto del dique, un tramo, un subsistema, una parte, o un conjunto de elementos. En todos los casos, el árbol debe recoger la forma en la que se declara el fallo (del dique, del tramo, del subsistema, de una parte, o de los elementos de la misma) en el diagrama de componentes, y en particular los modos de fallo que deben ocurrir (simultáneamente, o no).

Entre tramos del dique

El árbol debe recoger la propagación del fallo entre tramos, especificando los modos de fallo, subsistemas y tramos que lo desencadenan. Además, deben recoger las opciones y condicionantes de reparación y las consecuencias en caso de no hacerlo, el tiempo de supervivencia del tramo y del dique, y el riesgo de perder la conectividad terrestre del dique. En este caso se debe analizar si una brecha en el arranque (u otro tramo) impide acceder desde tierra a la zona averiada del dique y cómo condiciona los procesos de construcción, los medios necesarios, el tiempo de ejecución y su coste.

Entre subsistemas de un tramo

El árbol debe recoger la propagación del fallo entre subsistemas, especificando los modos de fallo que lo desencadenan. Además, debe recoger las opciones y condicionantes de reparación y las consecuencias en caso de no hacerlo, en particular, el tiempo de supervivencia del tramo y si el fallo de uno de los subsistemas determina la destrucción o el colapso del tramo. En su caso, se debe analizar si un deslizamiento profundo de la cimentación y del terreno puede ocasionar la destrucción del tramo y la necesidad de su reconstrucción completa utilizando medios y procesos similares a los de su construcción.

Entre modos de fallo de un subsistema

El árbol debe recoger la propagación de uno o varios modos de fallo en el subsistema al que pertenece, especificando los modos de fallo que lo desencadenan. Además, deben recoger las opciones y condicionantes de reparación y las consecuencias en caso de no hacerlo, en particular, el tiempo de supervivencia del subsistema y su incidencia en el tiempo de supervivencia del tramo y del dique cuando el del subsistema determina la destrucción o el colapso del tramo. A tal efecto, es conveniente elaborar una secuencia, parcial o total, de algunos, o todos, los modos de fallo del subsistema.

En el caso del subsistema exterior de cualquier tramo del dique una secuencia de trabajo puede ser la siguiente:

- ◆ erosión de pie →
- ◆ hundimiento, socavación, pérdida de elementos de la berma de pie →
- ◆ deslizamiento del manto principal, pérdida de piezas y variación geométrica del manto principal →
- ◆ pérdida de piezas de la berma de coronación →
- ◆ hundimiento, giro y desplazamiento de la superestructura.

Esta secuencia puede continuar en el subsistema interior

- ◆ fallos en el camino de rodadura →
- ◆ erosión del manto interior o (línea de muelle e infraestructuras de servicio).

El resultado final sería la destrucción o el colapso del tramo y, si se necesita reponer la finalidad del dique, su reconstrucción utilizando medios y procesos similares a los de su construcción.

El árbol expresa gráficamente este proceso y permite diseñar estrategias de reparación, medios, tiempo y costes, para controlar, con diversos niveles de intervención y costes, la evolución espaciotemporal de la seguridad del dique y su posible destrucción o colapso progresivo.

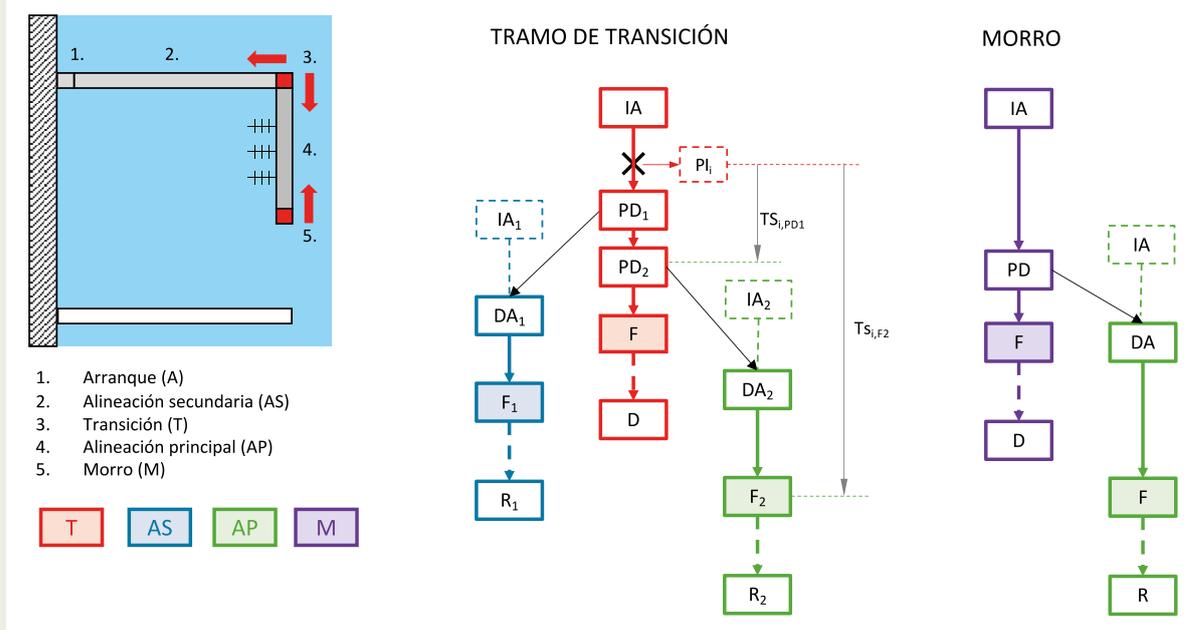
EJEMPLO

ÁRBOLES DE DESENCADENAMIENTO Y PROPAGACIÓN DEL FALLO PARA DIFERENTES TRAMOS, SUBSISTEMAS Y MODOS

A modo de ejemplo, se representan a continuación posibles diagramas de desencadenamiento y propagación por tramos y subsistemas para el dique descrito en la figura 3.7. En cada diagrama se señalan los puntos de inicio de avería (IA) de cada componente considerado, los puntos de desencadenamiento (PD) que señalan la magnitud de la avería que desencadena el daño en otros componentes (puede darse antes o después del fallo), los desencadenamientos de avería (DA) que señalan la magnitud con la que se desencadena el daño de los componentes (puede ser IA u otros), los puntos de fallo (F) que describen el daño que provoca el fallo de acuerdo con la concepción plasmada en los diagramas de componentes y los puntos de destrucción, que conllevan a la ruina del tramo (R), asociados a valores del daño que requieren la reconstrucción total de los componentes.

En la figura 3.13 se representan los árboles correspondientes al tramo de transición y al morro. En el primer caso, el daño deja desprotegidas lateralmente la alineación secundaria (AS) y la alineación principal (AP), desencadenándose así el fallo de éstas. En el segundo, el efecto es análogo pero afectando únicamente a la alineación principal (AP). Se señala a título indicativo la posibilidad de definir puntos intermedios (PI) a partir de los que evaluar el tiempo de supervivencia (TS) de cada componente, habitualmente en condiciones de no reparación. Si la avería en cada tramo continúa progresando, se alcanzan los fallos contemplados en el diagrama de componentes de la figura 3.8.

Figura 3.13: Árboles de desencadenamiento y propagación del fallo en los tramos de transición y morro



En las figuras 3.14 y 3.15 se representan los árboles de desencadenamiento y propagación del fallo correspondientes a los subsistemas del tramo arranque, alineación secundaria y tramo de transición. La secuencia que describe el primero de ellos parte de deformaciones en la cimentación o terreno que inducen deformaciones en el núcleo de la sección. Alcanzado un cierto nivel de deformación del núcleo, comienza a verse afectada la geometría de los mantos, que finalmente conduce a movimientos apreciables en la superestructura.

La secuencia que describe el segundo parte de la erosión y desplazamiento de piezas en la zona de barloomar del perímetro exterior. Cuando progresa hacia la coronación puede inducir movimientos de la superestructura. A su vez, si avanza lo suficiente puede dejar al descubierto zonas del núcleo que comiencen a perder material, ocasionando movimientos y asentamientos que conectan con el mecanismo del primer árbol.

Si la avería en cada subsistema continúa progresando, se alcanzan los fallos contemplados en el diagrama de componentes de la figura 3.9.

Figura 3.14: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de los tramos arranque, alineación secundaria y tramo de transición, como consecuencia de deformaciones y movimientos en la cimentación y terreno

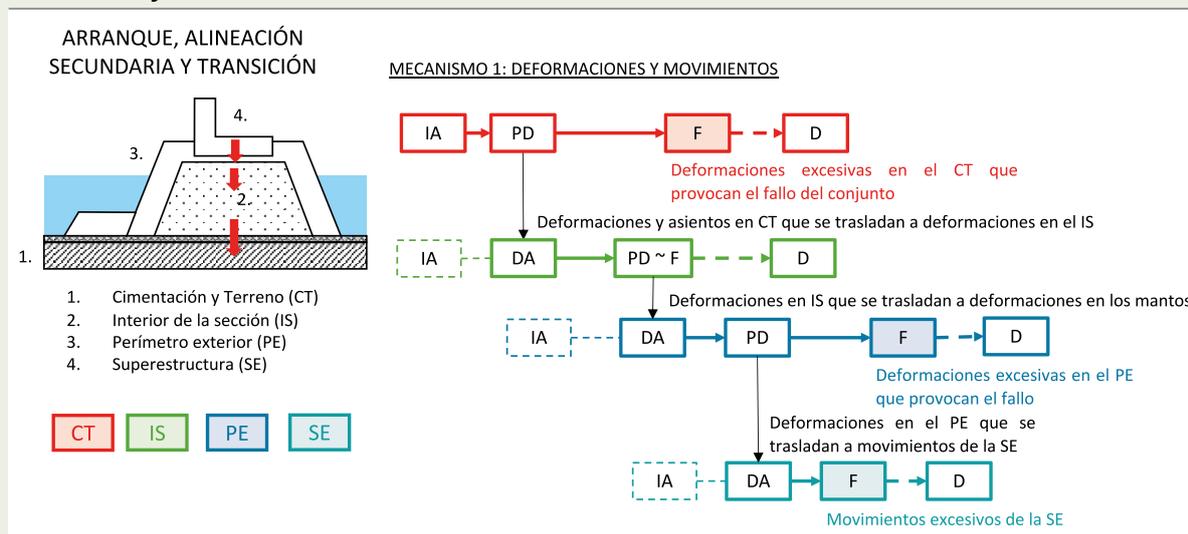
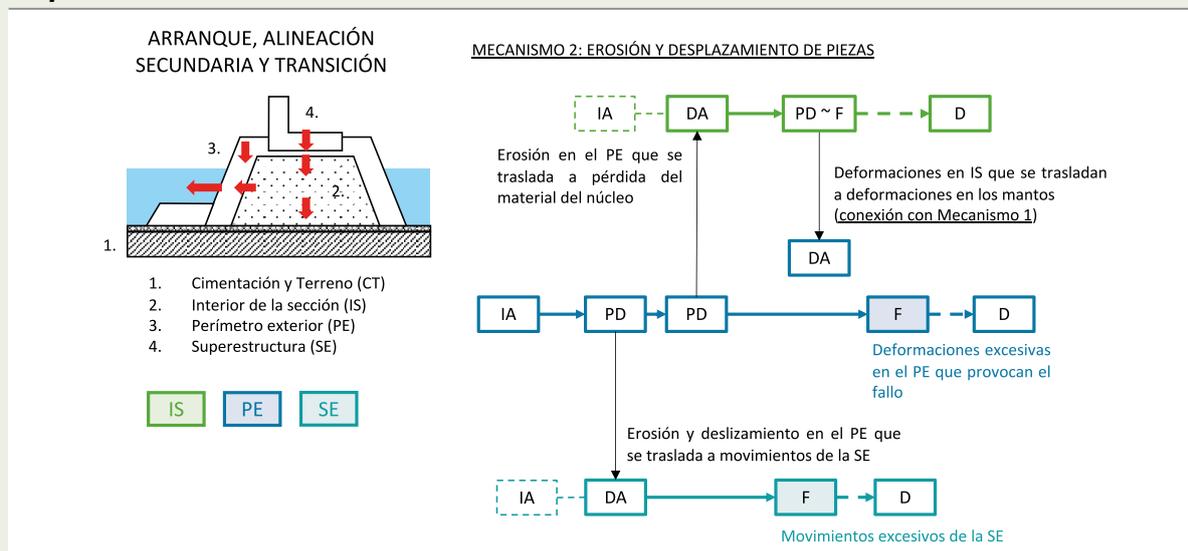


Figura 3.15: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de los tramos arranque, alineación secundaria y tramo de transición, como consecuencia de erosión y desplazamiento de las piezas del perímetro exterior



En las figuras 3.16 y 3.17 se representan los árboles de desencadenamiento y propagación del fallo correspondientes a los subsistemas de la alineación principal. La secuencia que describe el primero de ellos parte de deformaciones en la cimentación o terreno que inducen deformaciones en el núcleo de la sección. Alcanzado un cierto nivel de deformación del núcleo, comienza a verse afectada la geometría de los mantos, que finalmente conduce a movimientos apreciables en la superestructura. Estos movimientos, cuando se hacen excesivos, afectan al rebase que, a su vez, puede provocar el movimiento de piezas en la zona de sotamar del perímetro exterior.

La secuencia que describe el segundo parte de la erosión y desplazamiento de piezas en la zona de barloomar del perímetro exterior. Cuando progresa hacia la coronación puede inducir movimientos de la superestructura que afecten al rebase y éste puede inducir movimientos de las piezas del perímetro exterior de la zona de sotamar. A su vez, si el daño del perímetro exterior avanza lo suficiente, puede dejar al descubierto zonas del núcleo que comiencen a perder material ocasionando movimientos y asientos que conectan con el mecanismo del primer árbol.

Si la avería en cada subsistema continúa progresando, se alcanzan los fallos contemplados en el diagrama de componentes de la figura 3.9.

Figura 3.16: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de la alineación principal, como consecuencia de deformaciones y movimientos en la cimentación y terreno

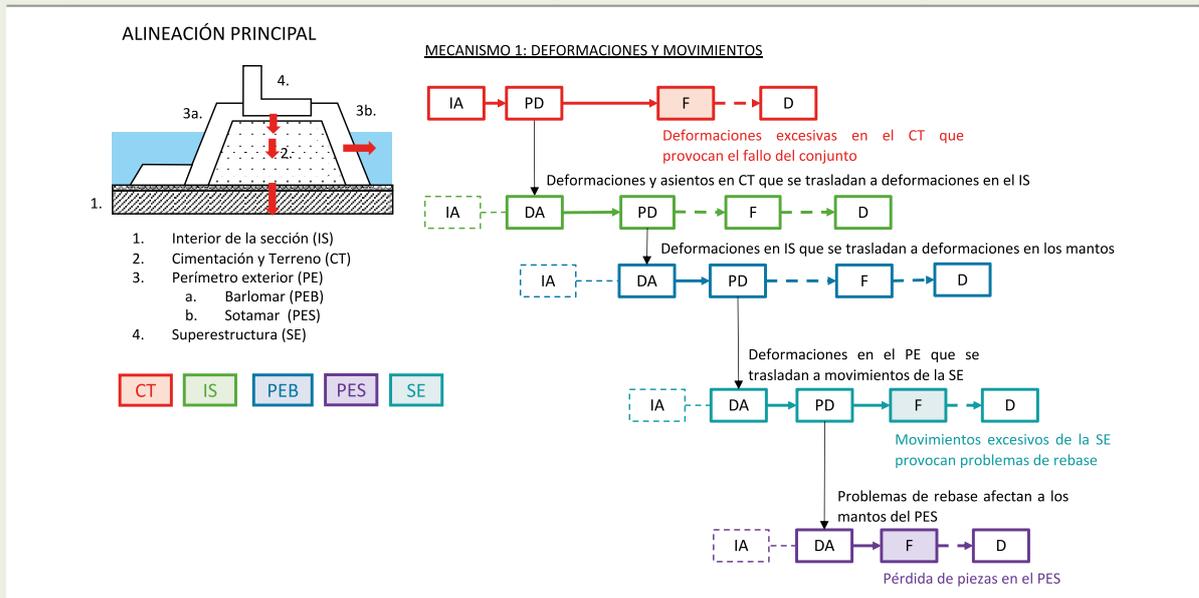
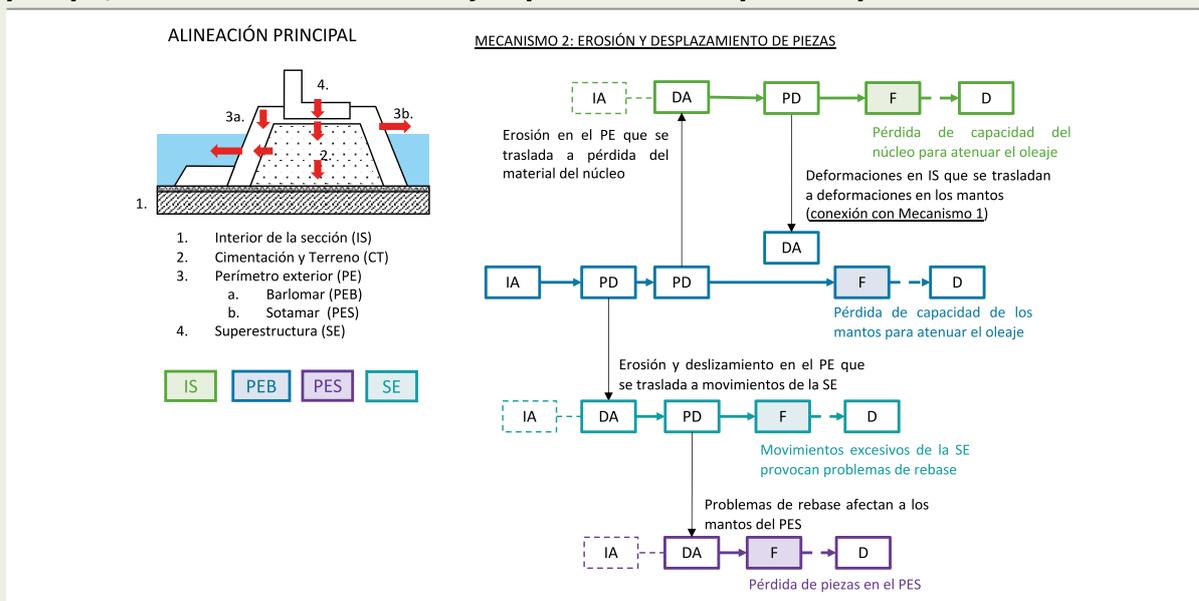


Figura 3.17: Árbol de desencadenamiento y propagación del fallo entre subsistemas de la alineación principal, como consecuencia de erosión y desplazamiento de las piezas del perímetro exterior



3.6.2 Diseño frente a la operatividad (condiciones de trabajo operativas normales)

Es conveniente elaborar los árboles para el conjunto del dique o para tramos específicos. En todos los casos el árbol debe recoger la forma en la que se declara el nivel de parada operativa (bien sea el área portuaria, bien un subárea específica, bien un tramo), en el diagrama de componentes, y en particular los agentes que participan y que deben ocurrir (simultáneamente, o no).

Para analizar la evolución espacio-temporal de la operatividad en el área portuaria, o en una de sus subáreas, es conveniente elaborar el árbol a escala de dique e incluir la valoración de los indicadores de la operatividad de la ROM 0.0-01, duración de la parada y número máximo de paradas y lo recomendado en esta Sección 3, Artículo 3.3.2.

Para analizar la evolución espacio-temporal de la operatividad en un tramo de dique, es conveniente elaborar el árbol a escala de tramo e incluir la valoración de los indicadores de la operatividad de la ROM 0.0-01, duración de la parada y número máximo de paradas.

3.6.3 Diseño frente a condiciones de trabajo post-excepcionales

De acuerdo con lo que se propone en la Sección 5, Artículo 5.6 de esta ROM 1.1-18, para algunos diques con fines específicos, en algunos emplazamientos, es necesario elaborar los árboles de desencadenamiento y propagación de modos de fallo para el conjunto del dique o de un tramo, vinculados a condiciones de trabajo post-excepcionales. En España, estas condiciones de trabajo se dan durante la ocurrencia de un sismo o de un maremoto excepcional o después de un temporal de carácter extremo, entre otras causas.

El procedimiento a seguir será análogo al indicado para condiciones de trabajo extremas. En todos los casos el árbol debe recoger la forma en la que se declara el fallo (del dique, o del tramo) en el diagrama de componentes, y en particular los modos de fallo que deben ocurrir (simultáneamente, o no).

3.7 DISEÑO A EVOLUCIÓN DE LA AVERÍA Y ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN

El diseño a nivel avanzado de avería amplía la capacidad del proyectista para proyectar una obra que se adecue mejor a los requisitos y condicionantes del Proyecto de Construcción y a la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión.

Para diseñar y dimensionar un dique considerando la evolución espacio-temporal de la avería es necesario especificar, entre otros, los siguientes requisitos,

- ◆ **frente a la fiabilidad en la vida útil:** el nivel de avería a la que se asocia la probabilidad de fallo del modo en la vida útil, (requisito de fiabilidad),
- ◆ **frente a la operatividad:** el umbral de avería que condiciona, cómo y cuánto, la operatividad del dique o del área portuaria, (requisito de operatividad),
- ◆ **frente a la reparación:** (a) cuándo, cuánto, cómo y en qué plazo se debe reparar, (requisito técnico), y (b) recursos disponibles para acometer la reparación, (requisito económico-financiero).

La decisión de diseñar a evolución de daño y de elaborar estrategias de reparación, (frente a la opción de diseñar a ELU), estará motivada, entre otros, por los siguientes factores técnicoeconómicos, económico-financieros y ambientales:

- (a) modelo de gestión del área portuaria y requerimientos de uso y explotación,
- (b) disponibilidad de materiales y medios constructivos,
- (c) características de los agentes climáticos marítimos,
- (d) requerimientos económico-financieros del Proyecto de Inversión a lo largo de la vida útil, y
- (e) requerimientos ambientales.

3.7.1 Elaboración de estrategias de reparación

Las estrategias de reparación deben caracterizar cuándo, cómo y cuánto se debe intervenir para asegurar que el comportamiento de la obra se ajusta a la concepción inicial del proyectista y que se cumplen los requisitos del proyecto.

La elaboración de una estrategia de reparación y la determinación de los criterios que la definen atenderá, entre otros, a los siguientes factores,

- (a) la importancia relativa del fallo de los componentes en los elementos jerárquicos de nivel superior;
- (b) el modelo de evolución de la avería, incluyendo la tasa de inicio de avería de cada componente y la velocidad con la que progresan;
- (c) el desencadenamiento del fallo en otros componentes, su importancia y modelo de evolución,
- (d) los criterios de aplicación,
- (e) los procedimientos de ejecución.

Los criterios de aplicación deben incluir, al menos, (a) una indicación inequívoca de cuándo (o en qué circunstancias) se inicia la reparación, (b) cuál debe ser el estado de la obra para declarar que ya no cumple con su finalidad (hasta qué nivel de avería se repara), y (c) la prioridad que tiene cada reparación, en ausencia de medios suficientes, frente a otras que se inicien simultáneamente.

Con respecto a los procedimientos de ejecución de los trabajos de reparación se considerará, con carácter general, lo indicado en el Artículo 3.8. Además se deberá tener en cuenta de forma específica que el resultado de la reparación no es inmediato, sino que, una vez que se dan los criterios de inicio de reparación, la avería puede seguir creciendo durante un cierto intervalo de tiempo. Éste dependerá, entre otros, de

- (a) la capacidad para detectar la avería,
- (b) la disponibilidad de medios,
- (c) los tiempos de movilización,
- (d) los niveles de operatividad de la maquinaria junto con los agentes climáticos,
- (e) el rendimiento de la labor de reparación, etc.

Estrategias de reparación cuando la vida útil está próxima a cumplirse

Cuando se produzca una avería que implique el fallo del dique o alguna de sus partes, en particular durante las etapas finales de la fase de servicio, además de la restauración total se deberán contemplar otras alternativas (por ejemplo, una restauración parcial, complementada con labores intensivas de seguimiento del daño y conservación), atendiendo a su coste y a los riesgos y consecuencias de la progresión del daño durante la vida útil remanente.

COMENTARIO

DISEÑO SIN Y CON ESTRATEGIA DE REPARACIÓN

Diseño sin estrategia de reparación

Si el dique se proyecta con un modelo ELU se admite que presentado el nivel de inicio de avería de un modo principal es necesario reconstruir el tramo para restaurar la finalidad del proyecto del dique. En estos casos, no es habitual especificar estrategias de reparación, ni consignar en los presupuestos partidas para tal eventualidad. Esta forma de proyectar un dique de abrigo prioriza la concepción de un diseño robusto que, en general, resulta con un elevado coste inicial.

La gestión de la avería se concreta en analizar su progreso espacio-temporal desde el nivel de inicio hasta la destrucción “real” y estimar el tiempo de supervivencia del tramo. La decisión de acometer la reconstrucción se toma, entre otras, en función de,

- ◆ la evolución de la avería,
- ◆ las consecuencias en la operatividad del área portuaria, y
- ◆ la disponibilidad de recursos económicos.

En la Sección 5 se incluye el método para calcular los costes del Proyecto de Construcción, incluyendo los de primera construcción y los costes probables de reconstrucción.

Diseño con estrategia de reparación

Por el contrario, una estrategia de reparación permite un diseño “menos robusto”, con un inicio de avería más probable, pero con una probabilidad reducida de que dicha avería progrese hasta el fallo, siempre que se acometan los trabajos programados de conservación y, en su caso, los de reparación. Esta forma de proyectar un dique de abrigo prioriza la concepción de un diseño de coste inicial y coste de reparación adecuados a las necesidades de abrigo del área portuaria y a las disponibilidades económicas y financieras del promotor de la obra.

En estos casos, para cada probabilidad $Pr[D_0, V]$ elegida, la probabilidad de que la avería progrese desde D_0 hasta el fallo depende del control ejercido por medio de una estrategia de reparación. Esta probabilidad está acotada por la probabilidad de fallo máxima asignada al modo de fallo en el reparto de probabilidades. La inversión se reparte por tanto entre la fase de construcción y la vida útil. En la Sección 5 se incluye el método para calcular los costes del Proyecto de Construcción, incluyendo los de primera construcción y los costes probables de reparación y, en su caso, de reconstrucción.

3.7.2 Árbol para la toma de decisiones entre estrategias de reparación

El resultado de la aplicación de cada estrategia puede transformarse en una estimación de los costes asociados que facilite la toma de decisiones (ver Artículo 5.3.1). Para su comparación es útil apoyarse en el árbol de decisiones y en sus versiones de árbol de supervivencia o árbol de probabilidad.

Previsiblemente, el tiempo medio de supervivencia menor está asociado a la estrategia de no reparación de algunos o todos los componentes del dique; mientras que el valor mayor está asociado a la estrategia de reparación inmediata (en el momento en que se inicia la avería) con una disponibilidad total de medios.

El tiempo medio de supervivencia asociado a la estrategia óptima a adoptar, considerando los costes correspondientes a cada opción, se encontrará en el intervalo entre aquellos dos valores.

COMENTARIO

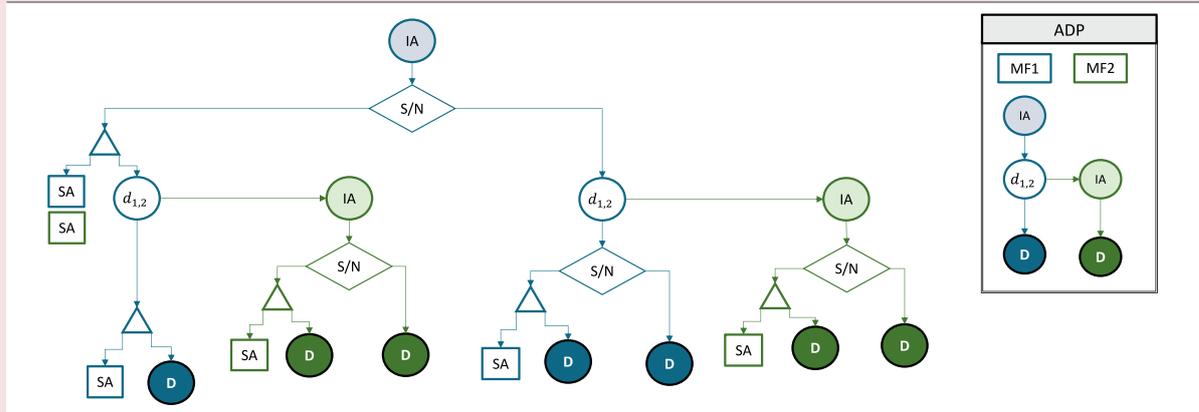
ESQUEMA DE ÁRBOL DE DECISIÓN PARA UN ÁRBOL DE DESENCADENAMIENTO Y POSIBLES ESTRATEGIAS DE REPARACIÓN

En la figura 3.18 se muestra el árbol de decisión para el árbol de desencadenamiento y propagación de arriba a la derecha, donde SA, IA y D corresponden, respectivamente, a los estados de “sin avería”, “inicio de avería” y “destrucción”. El desencadenamiento del modo 2 se produce cuando el modo 1 alcanza un daño $d_{1,2}$. En tal caso, las posibles estrategias son,

- (a) reparar ambos modos en cuanto se inician sus averías,
- (b) reparar el modo 1 en cuanto se inicia la avería y no reparar el modo 2,
- (c) reparar el modo 1 tras alcanzarse $d_{1,2}$ y reparar el modo 2,
- (d) reparar el modo 1 tras alcanzarse $d_{1,2}$ y no reparar el modo 2,
- (e) no reparar el modo 1 y reparar el modo 2, y
- (f) no reparar ningún modo.

Las decisiones de reparar, o no, se indican mediante las cajas triangulares, donde el camino de la izquierda representa las reparaciones exitosas y el de la derecha el caso contrario.

Figura 3.18: Ejemplo de árbol de decisiones

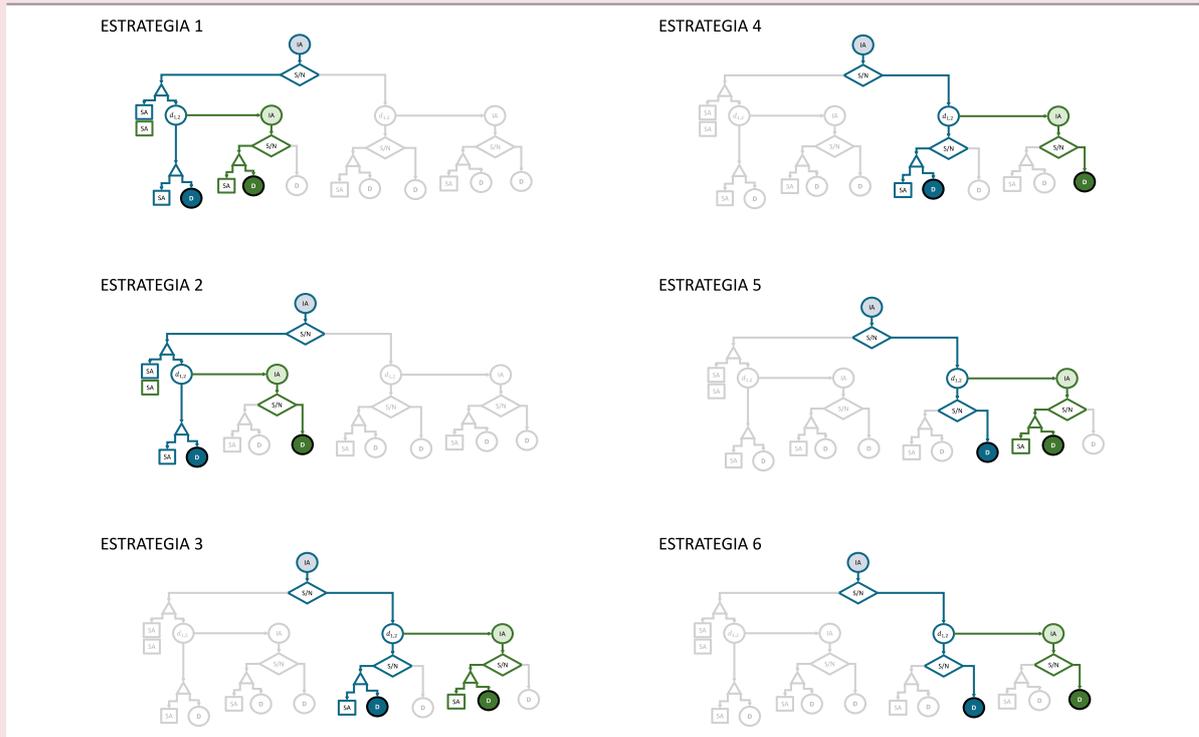


A partir de las opciones definidas en el árbol anterior, se pueden definir 6 estrategias (figura 3.19) que van desde el intento de reparación en el momento en el que se inicia la avería en cualquier modo (estrategia 1), hasta la de no reparación (estrategia 6). Los resultados de cada estrategia al cabo de un cierto intervalo de tiempo y la probabilidad de que se alcancen dependen conjuntamente de,

- ◆ la estrategia,
- ◆ los agentes,
- ◆ las probabilidades de éxito de las reparaciones,
- ◆ los modelos de evolución de la avería, y
- ◆ los árboles de desencadenamiento y propagación elaborados.

Seleccionados un intervalo de tiempo y una estrategia de reparación, la probabilidad de que se alcance un cierto nivel de avería en cada modo se puede obtener en función de la probabilidad de éxito, o no, de la reparación para evitar que la avería progrese al siguiente nivel.

Figura 3.19: Estrategias posibles definidas a partir del árbol de decisiones de la figura 3.18



3.8 ORGANIZACIÓN DE LA OBRA, PROCESOS Y MEDIOS

Los costes de construcción y los costes esperables de reparación, y el de sus repercusiones económicas y financieras por el incumplimiento de los fines del dique de abrigo dependen de la verosimilitud del Proyecto de Construcción, en particular del coste de construcción y de los costes esperables de reparación durante la vida útil. Estos costes están vinculados a la organización y los medios y procesos constructivos dispuestos y, su estudio y decisión, deben incluirse en los diferentes desarrollos del proyecto, desde los Estudios Previos hasta el Proyecto de Construcción.

En particular la decisión sobre alternativas y soluciones debe de analizar la conectividad técnica y económica entre los procesos de primera construcción y los de reparación tal y como se describe a continuación. Esta lista de tareas e hitos complementa y amplía la lista presentada en la Sección I de esta ROM 1.1-18 y es conveniente consultar ambas de forma simultánea.

3.8.1 Estudios preliminares

Se organizará y planificará la ejecución de todos los trabajos correspondientes a las fases de construcción, reparación y desmantelamiento. Partirá de unos estudios preliminares que analizarán todos aquellos específicos del entorno de la obra que puedan afectar a la ejecución de los trabajos, entre otros,

- (a) características de la red viaria y conexión con otras infraestructuras de transporte;
- (b) nivel de acceso a servicios tales como energía, agua, comunicaciones, etc.;
- (c) instalaciones existentes;
- (d) características del clima terrestre y marítimo;
- (e) características del suelo y orografía;
- (f) disponibilidad y coste de medios y materiales; y
- (g) características del mercado de trabajo y cadenas de suministros.

3.8.2 Descripción de las subfases constructivas y procedimientos

Los distintos trabajos a realizar se organizarán en subfases que abarcarán todos los procesos de abastecimiento y prefabricación, transporte y ejecución. Se evaluarán distintos procedimientos para cada una de ellas, que se caracterizarán por medio de, al menos,

- (a) la medición del trabajo a realizar y las tareas y unidades de obra que la componen,
- (b) los materiales, medios y recursos necesarios para ejecutarla, incluyendo estimaciones de velocidades de producción o abastecimiento, tiempos de movilización, reservas, volúmenes de acopios y costes,
- (c) las instalaciones requeridas (suministro de energía, almacenamiento, talleres, oficinas y otros servicios),
- (d) otros requisitos de ejecución de cada subfase, incluyendo las restricciones al avance y la dependencia con el progreso de otras subfases;
- (e) los modos de fallo y parada de cada una de las tareas que constituyen la subfase, sus relaciones de interdependencia y consecuencias; y
- (f) las estimaciones de operatividad, rendimiento y coste de los trabajos.

3.8.3 Planificación de la estrategia de construcción

Secuencia de trabajo y cronograma

Se definirá la secuencia de los trabajos y las relaciones de avance entre las distintas subfases de cada tramo (por ejemplo, mediante distancias mínimas entre frentes de avance), se acotarán las ventanas de trabajo de cada subfase de la obra, se analizará la oportunidad de paradas estacionales y su duración y se considerarán distintas estrategias de protección.

La estrategia de avance se plasmará en un cronograma que deberá incluir las fechas de inicio y finalización de la fase de construcción de la obra, así como, las fechas de comienzo y finalización de cada una de las subfases constructivas que componen la ejecución de la obra.

Medios y disponibilidad

La estrategia de construcción se concreta en la definición detallada de los medios asignados a cada subfase y sus características. Se considerarán medios, rendimientos, limitaciones climáticas, y velocidades de producción y abastecimiento necesarios para que el avance de los trabajos se ajuste al cronograma previsto, así como la necesidad de contar con repuestos, acopios y reservas.

Se estudiará la disponibilidad de materiales en la zona necesarios para la construcción de la obra. Se debe comprobar que las canteras, préstamos y/o yacimientos concretos proporcionan materiales que cumplen con las especificaciones requeridas, tienen capacidad para suministrar las cantidades de material necesario y disponen de los correspondientes permisos. También se considerará la pertinencia del establecimiento de instalaciones especiales como plantas de hormigón o machaqueo.

Se evaluarán las posibles afecciones de dichos medios y de la estrategia de avance sobre la capacidad de tráfico de la red viaria existente y se evaluará lo adecuado de las dimensiones de los accesos, señalización, caminos de rodadura, etc.

Índice Sección IV

SECCIÓN IV: VERIFICACIÓN DEL DIQUE DE ABRIGO EN UNA FASE DE PROYECTO

4.1	OBJETIVOS Y REQUISITOS DE PROYECTO DE UN DIQUE EN EL PROGRAMA ROM	123
4.1.1	Carácter del tramo en una fase de proyecto	124
4.2	PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA VERIFICACIÓN	128
4.2.1	Evaluación del comportamiento de un modo	128
4.2.2	Ecuación de verificación: planteamiento y formulación	130
4.2.3	Verificación integrada de los modos principales de un subsistema	132
4.2.4	Métodos de verificación	132
4.3	VERIFICACIÓN DE LOS MODOS A ESCALA DE TRAMO Y FASE DE PROYECTO	136
4.3.1	Escalas espacio-temporales para la verificación de los requisitos de proyecto	136
4.3.2	Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel I	138
4.3.3	Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel II y III	139
4.3.4	Verificación de condiciones de trabajo excepcionales, CT_3	142
4.4	MÉTODOS DE VERIFICACIÓN Y GRADO DE DESARROLLO DEL PROYECTO	148
4.4.1	Métodos de verificación según el grado de desarrollo del proyecto	149
4.4.2	Hipótesis de trabajo y simplificaciones según el grado de desarrollo	149
4.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD SEGÚN LOS FACTORES DE PROYECTO	155

4. Verificación del dique de abrigo en una fase de proyecto

Para cumplir su finalidad el dique de abrigo debe preservar sus características formales y estructurales a lo largo del tiempo y ofrecer las condiciones necesarias (operatividad) para el desarrollo de las actividades del área portuaria en la vida útil (y otras fases de proyecto) de la infraestructura. Este objetivo global se cumple cuando el dique y sus componentes (tramos, partes, subsistemas y elementos) conservan su geometría y cualidades resistentes con una probabilidad conjunta de fallo, **ROM 0.0-01**.

En esta sección se presenta el procedimiento para verificar si el proyecto de dique satisface, o no, los objetivos de proyecto, considerando la jerarquía espacial de las componentes y las diferentes escalas temporales del mismo recomendadas en la Sección 2. De acuerdo con la **ROM 0.0-01**, este procedimiento se especifica en función del carácter del tramo y la clase y grado de desarrollo del proyecto.

4.1 OBJETIVOS Y REQUISITOS DE PROYECTO DE UN DIQUE EN EL PROGRAMA ROM

En este contexto, el objetivo de la verificación consiste en determinar si se satisfacen, o no, los objetivos del proyecto y, en particular, los requisitos técnicos del Programa de “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)”, y comprobar si el comportamiento de la obra y sus componentes se ajusta a la concepción prevista por el proyectista.

Para aceptar que se cumplen los objetivos de proyecto, la **ROM 0.0-01** exige verificar el cumplimiento de unos requisitos con respecto a la fiabilidad y operatividad de la obra en un marco espacio-temporal específico: tramo de dique y fase de proyecto. Estos requisitos se determinan en función de las consecuencias del fallo y de la parada operativa evaluadas de forma aproximada mediante los indicadores de carácter del tramo en una fase de proyecto. Con esta manera de proceder, se está acotando, de hecho, un umbral inferior del nivel aceptable del riesgo del proyecto.

GENERALIZACIÓN DE LOS REQUISITOS A OTRAS ESCALAS ESPACIALES Y TEMPORALES

La jerarquización del dique en tramos, partes, subsistemas y elementos y la división de una fase de proyecto en subfases de duración inferior, facilita la generalización de aquellos requisitos a otros componentes y a otras escalas espaciales y temporales. El procedimiento para la verificación de los requisitos es análogo al recogido en la **ROM 0.0-01**, es decir independiente de la subfase y nivel jerárquico analizados.

4.1.1 Carácter del tramo en una fase de proyecto

De acuerdo con el apartado 1.7.1 de la ROM 0.0-01, corresponde al promotor de la obra marítima, público o privado, especificar el carácter general de la obra y sus tramos. En su ausencia, éste se establecerá, de forma aproximada, en función de los índices de repercusión económica (IRE) y de repercusión social y ambiental (ISA).

Análogamente, corresponde al promotor de la obra, público o privado, especificar el carácter operativo de la obra y sus tramos. En su ausencia, éste se establecerá, de forma aproximada, en función de los índices de repercusión económica operativo (IREO) y de repercusión social y ambiental operativo (ISAO) definidos en la ROM 0.0-01, apartado 2.7.

Índices de repercusión económica, IRE e IREO

El IRE valora las repercusiones económicas por reconstrucción del tramo y por cese o afección previsible de las actividades económicas directamente relacionadas con él, en el caso de producirse su destrucción. Este indicador acota la vida útil mínima del tramo de obra, de acuerdo con las indicaciones de la ROM 1.0-09, apartado 2.4.2.2.

El IREO valora los costes ocasionados por la pérdida de operatividad total del tramo. Se emplea para acotar la mínima operatividad del tramo en el intervalo de tiempo considerado, habitualmente un año, y se recoge en la ROM 1.0-09, apartado 2.5.1.

Índices de repercusión social y ambiental, ISA e ISAO

El ISA estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción total del tramo, valorando la posibilidad y alcance de (a) pérdidas de vidas humanas, (b) daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y (c) alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.

Este índice acota la máxima probabilidad de excedencia frente a la seguridad y el servicio en una fase de proyecto (en general la vida útil), o en el intervalo de tiempo de explotación considerado. Los valores máximos de las probabilidades conjunta de fallo son los especificados en la ROM 1.0-09, apartado 2.5.1.

El ISAO evalúa la repercusión social y ambiental esperable, en el caso de producirse la pérdida de operatividad total del tramo de obra en el intervalo de tiempo considerado. En función de su valor se acota el número medio de paradas operativas anuales admisible para el área abrigada o protegida y se recoge en la ROM 1.0-09, apartado 2.5.1.

Requisitos de proyecto del tramo

Cada tramo de dique debe cumplir en cada una de las fases de proyecto los siguientes requisitos:

- ◆ una vida útil mínima,
- ◆ una máxima probabilidad conjunta de los modos principales de fallo acotada en la vida útil, y
- ◆ una operatividad mínima acotada, por la ocurrencia de un número máximo de modos de parada anuales y una duración máxima acotada.

VIDA ÚTIL MÍNIMA

La vida útil de la obra es el período que transcurre durante la fase de servicio y, en general, corresponde al período de tiempo en el que la obra cumple la función principal para la que fue diseñada. En el Programa de “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)” la duración mínima de la vida útil del tramo se determina en función del IRE del tramo. La vida útil de otras fases de proyecto se determina en función de los objetivos de la fase y de su correspondencia económica, social y ambiental con los objetivos en la vida útil de la obra.

La duración mínima de la fase de servicio se indica en la tabla 4.1,

Tabla 4.1: Vida útil mínima en función del IRE

IRE	Vida útil en años
≤ 5	15
6 - 20	25
> 20	50

COMENTARIO

En España se ha extendido el plazo de las concesiones en el DPMT y en el DPPE por lo que es conveniente re-analizar la probabilidad conjunta de fallo de la obra incluyendo la prolongación del tiempo de concesión. Para ello, se debe considerar; (a) la duración de la nueva concesión, (b) el nivel de avería del dique y sus componentes al final de la vida útil inicialmente proyectada y, en su caso, (c) los modelos de evolución del daño de los distintos modos y las estrategias de reparación.

MÁXIMA PROBABILIDAD CONJUNTA DE LOS MODOS PRINCIPALES DE FALLO DE UN TRAMO

Esta probabilidad está acotada en la vida útil del tramo (apartado 2.2, ROM 0.0-01). Su valor se determina en función del ISA del tramo (diseño ELU) de acuerdo con la tabla 4.2 siguiente,

Tabla 4.2: Máxima probabilidad conjunta en la fase de servicio

ISA	Pf	β
< 5	0.20	0.84
5 - 19	0.10	1.28
20 - 29	0.01	2.32
≥ 30	0.0001	3.71

COMENTARIO

CORRESPONDENCIA ENTRE LA PROBABILIDAD CONJUNTA DE FALLO (TABLA 4.2) Y LAS VARIANTES Y MÉTODOS DE NIVEL I, II Y III

En estas Recomendaciones se adopta una única tabla con los valores máximos de la probabilidad conjunta de los modos principales de fallo en un tramo, y se aplican, tanto a los diques calculados inicio de avería, diseño ELU, como a los diques calculados a evolución espacio-temporal de la avería, diseño ELS.

Cuando el IRE e ISA del dique son bajos (Nivel I) y el proyecto de Construcción de dique no está asociado a un Proyecto de Inversión, (figura 1.8, Sección I), (diseño ELU), el proyectista selecciona a priori los niveles de inicio de avería (IA) y de destrucción (D) y la hipótesis de partida inicial es que los niveles de inicio de avería y avería de destrucción son cuasi-simultáneos (modelo escalón), en consecuencia, la probabilidad de fallo es la misma para los dos niveles, y para recuperar los fines del proyecto es necesario la reconstrucción del tramo.

Si el proyectista opta por dos niveles de avería diferenciados, el proyectista dispone de cierto margen para incorporar la evolución de la avería en el diseño y, en particular, calcular la resiliencia hasta la destrucción, una vez iniciada la avería.

En España, es habitual considerar en el proyecto de un dique en talud un tercer estado o nivel de avería intermedio (AI, avería Iribarren). En estos casos, el proyectista tiene diferentes opciones para vincular la máxima probabilidad conjunta de fallo con un nivel de avería determinado.

Dependiendo del tramo, tipología, subsistema y del modo de fallo considerado, la evolución de la avería entre niveles se puede describir por (figura 2.8 de la Sección 2, Artículo 2.4):

- (a) **Modelo escalón**, considerando que los niveles de inicio de avería y avería de destrucción son cuasi-simultáneos (modelo escalón), en consecuencia, la probabilidad de fallo es la misma para los dos niveles, y para recuperar los fines del proyecto es necesario la reconstrucción del tramo.
- (b) **Modelo pendiente creciente**, una vez iniciada la avería, la destrucción de la sección se alcanza si el estado meteorológico persiste tiempo suficiente (sin variación del nivel del mar). Si la probabilidad de fallo se vincula a la destrucción, se dispone de un cierto margen de tiempo para la reparación antes de la destrucción. Este margen depende, entre otros, de la tipología, del tramo del ángulo de incidencia del oleaje. Por ejemplo, (1) tramo alineación principal de un dique en talud construido con piezas esbeltas (p. ej. tetrápodos, dolos), o con una sola capa con piezas especiales (p. ej. acrópodos), (2) tramo morro construido con una estructura vertical, (3) tramo con incidencia muy oblicua o paralela al dique, etc. La probabilidad de fallo se puede adjudicar al nivel destrucción, pero una vez iniciada la avería, si no hay una estrategia realista de intervención, será necesaria la reconstrucción para recuperar la finalidad del dique y sus tramos.
- (c) **Modelo sigmoide**, una vez iniciada la avería se estabiliza mientras que no aumente la magnitud de la acción. Este comportamiento es el habitual en diques en talud protegido por manto principal se piezas compactas, dispuestas en dos capas y que, una vez extraídas, la mayoría de ellas permanecen en la sección conformando un talud de equilibrio. En estas situaciones, el dique se proyecta considerando que se repara cuando alcanza la avería Iribarren (AI) y se reconstruye cuando alcanza el nivel de destrucción (D). Vinculando la probabilidad de fallo a la destrucción hay un margen amplio para la intervención (reparación/reconstrucción) una vez iniciada la avería o alcanzada la avería Iribarren (AI).

Dique calculado por un método de Nivel I

Tal y como se describe en el Artículo 2.8, Variantes en la concepción y diseño de un dique de abrigo, el cálculo de los costes totales de un dique calculado a Nivel I (Variante 1) lleva implícito que, (1) se puede reparar o reconstruir de forma inmediata, y (2) hay recursos económicos suficientes para ello. En consecuencia, la certidumbre de que un dique calculado por un método de Nivel I cumpla los objetivos de proyecto depende de,

- ◆ la correcta representación del comportamiento del dique
- ◆ la selección adecuada de los niveles de avería y a cual se vincula la probabilidad de fallo y, en particular,
- ◆ el grado de cumplimiento con las hipótesis de intervención inmediata y de disponibilidad de recursos económicos suficientes.

Dependiendo de la tipología, del tramo, de la ubicación y concepción del dique, esta forma de diseñar puede dar lugar a diques sobredimensionados, en otras, infradimensionados (posiblemente abandonados a su suerte) y, en algunas ocasiones, en particular cuando no hay previsión económica para la intervención, a tener que recurrir a diferentes opciones de financiación, presupuestos extraordinarios, declaración de obras de emergencia, etc. cuando la reparación/reconstrucción es imprescindible para la operatividad del área portuaria. Si hay dudas fundadas del incumplimiento de los supuestos de reparación/reconstrucción, una manera de reducir la incertidumbre del proyecto, es aplicar la Variante 2 (descrita en el Artículo 2.8) para calcular los costes totales del dique que incluye, bajo ciertos supuestos, el análisis de la evolución temporal de la avería.

Dique calculado por un método de Nivel II o III

Cuando el IRE e ISA del dique son altos (Nivel II o III) y está asociado a una proyecto de Inversión, (figura 1.8 de la Sección 1) (diseño ELS), los niveles de avería evolucionan en el tiempo y en el espacio, especificando la relación entre el inicio y los niveles subsiguientes de avería hasta la destrucción y con el desencadenamiento y la progresión de otros modos de fallo (Artículo 2.8, Variantes 3).

La decisión sobre umbrales de avería están asociadas al progreso, propagación e interacción con los otros modos de fallo, las estrategias de reparación y los costes totales; son un resultado del sistema dual de optimización e inciden directamente en la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión.

En esta ROM 1.1-18 se proponen planteamientos, métodos y herramientas para considerar la evolución espacio-temporal de la avería y la definición de estrategias de reparación como parte integral del diseño que permiten adecuarlo mejor a los fines de la obra. En estos casos, la probabilidad conjunta de fallo entre los modos principales se reparte en el nivel de destrucción. Su traslación a otros niveles de avería se especifica en la Sección 2, Artículo 2.5.

OPERATIVIDAD MÍNIMA, NÚMERO MEDIO DE PARADAS Y DURACIÓN MÁXIMA PROBABLE

La operatividad de un tramo es el valor complementario de la probabilidad de parada frente a todos los modos de parada principales en un intervalo de tiempo que, habitualmente, es un año (apartado 2.2, ROM 0.0-01). Su valor mínimo se determina en función del IREO. El número medio de paradas operativas en un intervalo de tiempo (año) se determina en función del ISAO, y la duración máxima probable de una parada operativa se determina en función del IREO y del ISAO.

La operatividad en el intervalo de tiempo considerado (año) será igual o superior al valor indicado en la siguiente tabla 4.3,

Tabla 4.3: Operatividad mínima en la fase de servicio

IREO	$r_{f,ELO}$	β_{ELO}
≤ 5	0.85	1.04
6 - 20	0.95	1.65
> 20	0.99	2.32

El número medio de paradas en el intervalo de tiempo (año) será igual o inferior al valor indicado en la siguiente tabla 4.4,

Tabla 4.4: N° medio de paradas anuales en función del ISAO

ISAO	N° medio de paradas
< 5	10
5 - 19	5
20 - 29	2
≥ 30	0

La duración máxima probable de una parada operativa en el intervalo de tiempo (año) será igual o inferior al valor indicado en la siguiente tabla 4.5,

Tabla 4.5: Duración máxima probable de una parada en función del IREO y del ISAO

IREO	ISAO			
	< 5	5 - 19	20 - 29	≥ 30
≤ 5	24h	12h	6h	0
6 - 20	12h	6h	3h	0
> 20	6h	3h	1h	0

COMENTARIO

Para armonizar el diseño a evolución de daño y el uso y explotación del tramo, en esta ROM se amplían los niveles de operatividad admisibles. Los valores de las tablas 4.3, 4.4 y 4.5 son indicativos y, en general, se asocian al nivel de cese completo de la actividad en el tramo. Los niveles de operatividad y los umbrales adoptados deben decidirse en función de los resultados del análisis de rentabilidad económica y financiera y de la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión (MEIPOR-16).

Indicadores de la operatividad del área portuaria

Los indicadores estadísticos anteriores se pueden aplicar, formalmente, al conjunto de las infraestructuras y elementos que configuran el área portuaria y a sus servicios. El proceso a seguir es similar al que se recomienda para el dique y sus tramos (Sección 3): jerarquizar los componentes que configuran el área en sistemas, subáreas e infraestructuras, establecer sus relaciones y cuantificar las consecuencias de la parada operativa en la gestión de los servicios que proporciona el área.

A partir de la información anterior y mediante la simulación del estado del área, incluyendo los tráficos de buques y los movimientos de mercancías, se puede estimar su operatividad global y nivel de riesgo en la vida útil o en cualquier otro intervalo de tiempo. De acuerdo con MEIPOR, los indicadores de la operatividad del área y de cada una de sus subáreas se determinarán a partir de los análisis de la rentabilidad financiera y económica y de la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión.

No obstante, en Estudios Previos y Estudios de Alternativas y de Soluciones se puede definir y determinar (por analogía con el método ROM), los índices IRE, IREO, ISA e ISA de cada una de las subáreas portuarias. En este caso, se pueden tomar los valores de las tablas anteriores como indicativos.

4.2 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA LA VERIFICACIÓN

Con generalidad, (capítulos 4 a 6 de la ROM 0.0-01 y apartado 2.6 de la ROM 1.0-09), en el Programa ROM la verificación de los objetivos de proyecto del tramo de dique frente a la seguridad se formula por unos modos de fallo que caracterizan la manera en la que uno, o varios componentes del tramo pierden su capacidad formal y estructural. El objetivo de la verificación es comprobar que la probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo frente a la seguridad del tramo en la vida útil no excede los valores consignados en la tabla 4.2. En la citada ROM 1.0-09 se dan criterios para especificar los valores de los requisitos de proyecto en otras fases de proyecto.

Análogamente, la verificación de los objetivos de proyecto del tramo frente a la operatividad se formula por unos modos de parada operativa que caracterizan la manera en la que uno, o varios componentes provocan la pérdida de operatividad del tramo. El objetivo de la verificación es comprobar que en el intervalo de tiempo considerado (cualquier año de la vida útil), se cumplen los valores consignados en las tablas 4.3, 4.4 y 4.5.

4.2.1 Evaluación del comportamiento de un modo

El desencadenamiento del modo y de los subsiguientes niveles de fallo (y de parada operativa) se puede concretar mediante,

- ◆ resolución de una ecuación (de verificación)
- ◆ experimentación física en el laboratorio o *in situ*
- ◆ experimentación numérica
- ◆ norma de buenas prácticas

Resolución de una ecuación de verificación

Habitualmente la ecuación de verificación de un modo de fallo (o parada) es la misma que caracteriza su comportamiento formal y estructural (u operativo), se formula a escala de estado. Cuando los agentes predominantes son los climáticos, o el terreno, es conveniente expresar los términos de la ecuación en función de monomios adimensionales relacionados con las características del emplazamiento, el oleaje, el terreno, el comportamiento del dique y las propiedades de los materiales.

Experimentación en el laboratorio o «in situ»

La verificación de los modos de fallo y de parada de un tramo se pueden realizar mediante experimentación física en el laboratorio, debidamente acreditados, o *in situ* (Pérez-Romero et al., 2009). En todos los casos se concretarán los componentes verificados, la escala temporal de la verificación, los monomios adimensionales de los agentes, acciones y procesos que caracterizan el comportamiento de la obra y su formulación.

El alcance, número de ensayos y repeticiones, las condiciones de trabajo y ciclos de sollicitación y de calma, la caracterización de los estados y su duración depende de,

- (a) el carácter de la obra y del coste de la inversión del proyecto
- (b) el nivel de desarrollo del proyecto
- (c) la modalidad de diseño, con o sin evolución de avería

En general, no es necesario que los proyectos de IRE e ISA bajos (Nivel I) y sin Proyecto de Inversión (Clase I) se verifiquen en el laboratorio salvo si, por una especificidad local en un tramo y a juicio del proyectista o de la Administración promotora de la obra, es oportuno hacerlo.

Es conveniente verificar experimentalmente los diques y tramos con IRE e ISA altos (Nivel II o III) y con Proyecto de Inversión (Clase II), en particular, aquellos tramos (morro, cambios de alineación y transiciones) y el subsistema perímetro exterior de otras alineaciones, que más afectan a la sensibilidad de los resultados de diseño Proyecto que se proyectan a evolución de daño, elaborando árboles de desencadenamiento y estrategias de reparación.

COMENTARIO

Es conveniente considerar que,

- ◆ el alcance de los ensayos debe ser objeto de un proyecto donde se especifique sus objetivos, la ejecución y el análisis de los resultados;
- ◆ los resultados obtenidos deben proporcionar la información necesaria para el desarrollo de los trabajos y la aplicación subsiguiente de MEIPOR;
- ◆ para determinar el nivel de confianza del resultado experimental, se debe repetir el mismo ensayo un número mínimo de veces;
- ◆ no es recomendable utilizar el laboratorio para diseñar si no para verificar el diseño.

Los objetivos y las especificaciones técnicas del ensayo experimental se recogen en los “Anejos de especificaciones técnicas generales para el proyecto” de estas Recomendaciones.

Experimentación numérica

Los modos de fallo y de parada de un tramo se podrán verificar mediante experimentación numérica con códigos debidamente contrastados y validados (Vílchez et al., 2016a). Además de lo recogido en el comentario anterior, es conveniente especificar,

- (a) los componentes verificados,

- (b) la escala temporal de la verificación,
- (c) los monomios adimensionales de los agentes, acciones y procesos que caracterizan el comportamiento de la obra, y
- (d) la formulación, tal y como se detalla en el Artículo anterior.

COMENTARIO

Los objetivos y las especificaciones técnicas del ensayo numérico se recogen en los “Anejos de especificaciones técnicas generales para el proyecto” de estas Recomendaciones.

Verificación mediante normas de buenas prácticas

Un modo de fallo o de parada se podrá verificar aplicando normas de buenas prácticas sólo cuando sea, o se han tomado las medidas necesarias para considerarlo, no principal. En todos los casos, se debe de atender los mismos requerimientos técnicos que las otras formas de verificación.

Otros procedimientos de verificación de un modo

Cuando los requisitos de proyecto o los modos y su correspondiente ecuación de verificación no describen adecuadamente el incumplimiento de los objetivos de proyecto se habilitarán, debidamente justificados, otros procedimientos de verificación. Incluirán las razones de la inadecuación o su conveniencia, en su caso, el procedimiento para determinar los requisitos de proyecto, y el método, las escalas temporales y espaciales y los criterios para verificar el modo o conjunto de modos. Si procede, se elaborará un método para cuantificar las consecuencias de la ocurrencia del conjunto de modos y se incluirá en el cálculo de los costes del Proyecto de Inversión.

En todos los casos, se debe de atender los mismos requerimientos técnicos que las otras formas de verificación.

4.2.2 Ecuación de verificación: planteamiento y formulación

En general, el estado (meteorológico) es la escala temporal a la que se formula la ecuación de verificación de los modos de fallo provocados por los agentes climáticos o del terreno. La elaboración y desarrollo de una ecuación de verificación incluye (capítulos 4 y 5 de la ROM 0.0-01), al menos, lo siguiente,

- ◆ la formulación y formato de la ecuación,
- ◆ los criterios para asignar y combinar valores a factores de proyecto y términos,
- ◆ el método de resolución de la ecuación.

El planteamiento de la ecuación condiciona la extensión de sus resultados a la vida útil u otra fase de proyecto que, además, depende del carácter del tramo y del grado de desarrollo del proyecto.

Formulación y formato de la ecuación de estado

La formulación de la ecuación debe permitir cuantificar la forma o manera como se produce o progresa la avería. En general, es un balance entre los términos favorables y desfavorables a su desencadenamiento y progreso y depende del nivel de avería que se considere. La formulación de la ecuación de estado se debe adecuar al Nivel de verificación que le corresponda con la Variante seleccionada.

De acuerdo con el apartado 4.4 de la ROM 0.0-01, el formato de la ecuación de verificación podrá ser, “Coeficiente de Seguridad Global”, Z, o “Margen de Seguridad”, S. En general, los modos de fallo cuyo agente predominante es el oleaje (p. ej. del subsistema perímetro exterior), tienen una ecuación de verificación en formato margen de

seguridad. Para modos de fallo cuyo agente predominante es el terreno (p. ej. del subsistema cimentación y terreno), el formato más habitual de la ecuación es el de coeficiente de seguridad.

El coeficiente de seguridad es el cociente entre los términos favorables, $X_1(x, t)$, y los desfavorables, $X_2(x, t)$. La verificación positiva se dará cuando el coeficiente de seguridad supere un cierto valor mínimo, $Z(x, t) > Z_c$.

$$Z(x, t) = \frac{X_1(x, t)}{X_2(x, t)} > Z_c \quad (4.1)$$

donde, t denota el tiempo y x la ubicación espacial y la geometría del componente y del tramo en el nivel de avería considerado. Los valores de Z_c dependen, entre otros, del carácter de la obra, de las condiciones de trabajo y de la fiabilidad de la ecuación. Z_c y $Z(x, t)$ son valores adimensionales.

El margen de seguridad es la diferencia entre los términos favorables, $X_1(x, t)$, y los desfavorables, $X_2(x, t)$. La verificación positiva se otorgará cuando $S(x, t) > S_0$,

$$S(x, t) = X_1(x, t) - X_2(x, t) > S_0 \quad (4.2)$$

donde S_0 podrá ser un valor igual o mayor que cero y depende, entre otros, del carácter de la obra, de las condiciones de trabajo y de la fiabilidad de la ecuación. Si los términos de la ecuación son dimensionales, S_0 y $S(x, t)$ también lo son.

Dependencia temporal de S y Z y descriptores de estado

Cuando el, o los agentes predominantes en el modo de fallo son, entre otros, los agentes climáticos, el terreno o el sismo, el valor del coeficiente y del margen de seguridad varía de acuerdo con la variabilidad temporal de los agentes, por lo que éstos son, en sentido estricto, variables aleatorias, con un modelo de probabilidad y descriptores de estado.

Dependiendo del mecanismo de fallo y de la formulación de la ecuación, los valores críticos de $S(t)$ o $Z(t)$ pueden estar desfasados en el tiempo con el agente predominante. Asimismo, la banda de frecuencias de su función de densidad espectral puede diferir de la correspondiente del agente predominante.

Cuando los modos de fallo del dique de abrigo se deben a la acción oleaje, se puede admitir la respuesta instantánea de la estructura, en general, como sólido rígido. Bajo esta hipótesis, la serie temporal desplazamiento vertical de la superficie libre, así como la de sus acciones y la de los términos de la ecuación, se puede discretizar en una secuencia de intervalos de tiempo, por ejemplo, entre pasos ascendentes por cero (u otro nivel equivalente), y, en cada uno de ellos, definir las variables aleatorias, picos positivos y negativos, valor máximo del pico o amplitud y máxima distancia vertical entre máximos positivos y negativos.

Con los pares de valores, intervalo de tiempo - variable aleatoria, se pueden formar conjuntos muestrales e inferir el modelo de probabilidad y sus descriptores de estado. Así mismo para cada uno de ellos se puede estimar el modelo de probabilidad y los descriptores del valor máximo en el estado en función del número de pares de valores de la muestra que es equivalente a la duración del estado.

Si la verificación se lleva a cabo a inicio de avería, excepto en el análisis de durabilidad en el que se analiza el deterioro temporal de la capacidad estructural y formal del componente, X_2 es un valor independiente del tiempo, aunque su valor tiene la misma probabilidad de excedencia en todos los estados de la vida útil de la obra, mientras que no se averíe y ésta no se repare.

Nivel de avería y evolución espacio-temporal de los términos de la ecuación

Cuando se diseña a evolución de avería, la ecuación de verificación debe cuantificar el balance de los términos de la ecuación en el nivel de avería considerado. $X_1(x, t)$ y $X_2(x, t)$ deben valorar la acción de los agentes predominantes

con el nivel de avería de la componente y su respuesta, respectivamente, donde x denota la ubicación espacial de la componente y su geometría con el nivel de avería considerado, y t el tiempo (o estado) en el que se verifica. Para los modos de fallo del perímetro exterior del tramo es habitual utilizar la misma ecuación de verificación para los diferentes niveles de avería, incluido el de destrucción. Éstos se consideran en el valor del monomio adimensional que lo cuantifica, por ejemplo, la función o número de estabilidad de las piezas del manto principal de un dique en talud.

4.2.3 Verificación integrada de los modos principales de un subsistema

La verificación del comportamiento de dos o más modos de fallo de componentes de un mismo subsistema (por ejemplo, berma de pie, manto principal y superestructura) y considerando su interacción se puede acometer, como se ha detallado anteriormente, de forma individualizada, o simultánea. En este caso, se debe integrar cada una de las ecuaciones de verificación en un sistema de ecuaciones que se debe resolver simultáneamente. En su caso, se pueden añadir diferentes restricciones o condicionantes geométricos al sistema.

Las ecuaciones de verificación deben formularse en el mismo dominio temporal con factores de proyecto comunes y no comunes. Se debe considerar que, si los modos de fallo causados por el mismo agente predominante, ocurren en diferentes lugares (por ejemplo subsistema berma, manto principal, superestructura) los valores locales del descriptor de estado están relacionados en función de la evolución espacial del agente predominante.

COMENTARIO

En el estado del arte actual no hay limitación técnica para formular y verificar de forma simultánea (para el mismo estado) los modos de fallo del subsistema perímetro exterior, al menos, hasta que los cambios geométricos de la sección afecten el comportamiento del agente y los modos de fallo interaccionen entre ellos.

Es habitual que, durante el ensayo (formado por varios runs de trenes de ola) se lleve la sección hasta destrucción sin realizar labores de reparación y sin observar o medir otros modos de fallo. En general, los resultados experimentales de los modos principales de fallo del perímetro exterior del dique incluyen las curvas de evolución de daño de forma independiente, sin tener en cuenta el comportamiento de los otros modos.

No obstante, los laboratorios están capacitados para ejecutar ensayos específicos para analizar el comportamiento simultáneo de varios modos y su evolución simultánea. Para fortalecer esta práctica experimental, es necesario, (1) minimizar los efectos de escala y (2) ampliar los medios y técnicas de observación de la evolución temporal del comportamiento de los componentes del dique, tramo, o subsistema, medida del nivel de avería, el desencadenamiento y el progreso en otros componentes.

La evolución simultánea de los factores de proyecto sobre el perímetro exterior del dique y la medida del progreso de las averías, es la necesaria para formular el sistema de ecuaciones para verificación integral de los modos de fallo principales del subsistema perímetro exterior.

Este conocimiento debe favorecer el diseño de infraestructuras con un coste de primera construcción más contenido, unas estrategias de conservación y reparación más eficientes, y un desfase de las inversiones más acorde con la sostenibilidad financiera del área portuaria.

4.2.4 Métodos de verificación

En el ámbito de estas Recomendaciones la asignación de valores de los términos y la resolución de la ecuación de verificación se realiza por uno de los tres métodos siguientes, Nivel I, Nivel II y Nivel III, apartado 4.10 de la ROM 0.0-01. Difieren en el modo en que se asignan valores a los términos de la ecuación (ver apartado 2.6.1 de la ROM 0.0-09), la resolución de la ecuación y el resultado que proporcionan.

El empleo de uno u otro método depende del grado de detalle y la precisión de los resultados esperados que es función, a su vez, del carácter de la obra y el grado de desarrollo del proyecto (ver tabla 4.4 de esta sección).

Con carácter general, un método de Nivel I requiere menos información para asignar valores, pero su incertidumbre es mayor, su alcance limitado y la fiabilidad del proyecto no está acotada. Su aplicación es muy conveniente en los grados de desarrollo iniciales del proyecto y utilizar su resultado como referencia en el resto del proceso. Los métodos de Nivel II y III son los más adecuados cuando los objetivos específicos del proyecto son, entre otros,

- ◆ adecuar los costes totales a las disponibilidades presupuestarias y a la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión,
- ◆ minimizar la incertidumbre y maximizar la fiabilidad del proyecto de Construcción y
- ◆ decidir en función del nivel aceptable de riesgo del Proyecto de Inversión.

En todos los casos es necesario prescribir las condiciones que deben satisfacerse para declarar si ocurre, o no, el nivel de avería analizado. Cuando el resultado de la ecuación no supera un valor mínimo del margen o el coeficiente de seguridad se admite que se produce el fallo o la parada operativa. Los valores mínimos son específicos para cada forma de construir y resolver la ecuación, aunque entre ellos, hay relaciones de compatibilidad.

COMENTARIO

En algunos textos técnicos (por ejemplo, en los Eurocódigos), los métodos de coeficiente de seguridad global se clasifican como de Nivel 0, y los de coeficientes parciales como de Nivel I.

Asignación de valores en una ecuación de verificación

Según sea el criterio de asignación de valores a los agentes y a sus acciones, los términos de la ecuación de verificación, $X_1(x,t)$ y $X_2(x,t)$, podrán tomar, (a) valores que varían de forma continua con el tiempo (series temporales), (b) valores discretos a intervalos de tiempo finitos o (c) valor único en el estado. En estos dos últimos los valores podrán ser descriptores de estado o valores característicos multiplicados, o no, por coeficientes de ponderación.

La asignación de valores podrá fundamentarse en criterios, (a) determinista, (b) deterministaprobabilista (semi-probabilista), y (c) estrictamente probabilista, lo que determinará la cantidad, calidad y tipo de información de partida y condicionará el método de verificación a aplicar. En general los métodos de Nivel I se aplican con criterios determinista y semi-probabilista y los métodos de Nivel II y III están vinculados a criterios semi-probabilista y estrictamente probabilista.

DETERMINISTA

Los valores serán nominales y elegidos por razones técnicas, de experiencia u otras. No se cuantifica ni la variabilidad ni la aleatoriedad de los agentes y parámetros del medio físico. El margen y el coeficiente de seguridad tomarán valores crecientes a medida que la incertidumbre de la ecuación y de los datos sea mayor y si los términos están afectados, o no, por coeficientes de ponderación, (capítulo 5 de la ROM 0.0-01).

SEMI-PROBABILISTA

Las magnitudes de los agentes y de los términos de la ecuación (en particular los del medio físico climáticos y sísmicos, los de uso y explotación y, en su caso, los del terreno) serán valores característicos que se determinarán a partir de sus respectivos modelos de probabilidad, conjunta, condicional o marginal.

Si el valor del agente predominante se asigna en función de su probabilidad de excedencia en la fase de proyecto, el margen de seguridad deberá ser positivo y el coeficiente de seguridad igual o mayor que la unidad.

PROBABILISTA

Los valores de los términos de la ecuación son un resultado del propio proceso de resolución, teniendo en cuenta los modelos de probabilidad, conjunta, condicional o marginal de los agentes y parámetros que toman parte. El margen de seguridad será igual a cero o positivo y el coeficiente de seguridad será igual a la unidad.

Resultado de la ecuación de estado

El resultado, $S(t)$ o $Z(t)$, de la resolución de la ecuación de verificación depende de la escala temporal de las variables que intervienen en los términos $X_1(t)$, $X_2(t)$. El criterio para declarar la verificación, o no, del modo de fallo es comprobar que estos valores, alguno de sus estadísticos o un valor determinista sea mayor o igual que un valor crítico, $S_{min} > S_0$, $Z_{min} > Z_c$. En general, los valores críticos son específicos de cada método de verificación.

VALORES DETERMINISTAS Y NIVEL I

Si se asignan valores deterministas y se resuelve por un método de Nivel I, el resultado de la ecuación es un valor del margen o del coeficiente de seguridad. El modo se podrá declarar verificado si estos valores son igual o mayor que los valores críticos prescritos para ese modo de fallo, estado límite, con los criterios y combinación de factores y términos adoptados, para una condición de trabajo en la fase de proyecto.

DESCRIPTORES DE ESTADO Y NIVEL I, II O III

Si se trabaja con los descriptores de estado de los agentes predominantes, p. ej. la altura de ola máxima en el estado, o de los términos, el resultado de la ecuación es un valor del margen o del coeficiente de seguridad asociado a ese descriptor. Este valor se comparará con el valor crítico prescrito. En este caso, la probabilidad de que se produzca, al menos una vez, el modo de fallo en un intervalo de tiempo dado (p. ej. fase de proyecto) se podrá aproximar por el producto de la probabilidad de que en ese intervalo de tiempo se excedan los valores de los agentes predominantes por la probabilidad de que, habiéndose presentado el estado, se produzca el fallo.

Si se conoce el modelo de probabilidad de los descriptores de estado de los agentes predominantes, se puede calcular, analítica o numéricamente, la función de distribución (función derivada) del margen o coeficiente de seguridad y a partir de ella obtener la probabilidad de excedencia del valor crítico.

Si no hay una ecuación de verificación debidamente contrastada formulada con los descriptores de estado de los agentes predominantes, pero existe una ecuación obtenida con trenes regulares de olas, la función de distribución de los términos de la ecuación (y de su resultado, margen o coeficiente de seguridad) se puede aproximar aplicando la hipótesis de equivalencia entre las acciones debidas a trenes regulares y debidas a trenes irregulares de olas.

SERIES TEMPORALES Y NIVEL II O III

Si se trabaja con las series temporales de los términos de la ecuación y se resuelve un número elevado de veces con diferentes secuencias temporales de los agentes, se pueden inferir los modelos de probabilidad de las variables aleatorias picos máximos y su valor máximo o mínimo en el estado y la función de distribución de los valores mínimos del margen o coeficiente de seguridad. A partir de ésta se puede estimar la probabilidad con la que se excede el valor crítico, S_0 o Z_c .

COMENTARIO

La descripción del oleaje en un estado en los dominios del tiempo y de la frecuencia se detalla en los capítulos 3 y 4 de la ROM 1.0-09. Se apoya en la consideración del oleaje en un punto del mar como un proceso aleatorio estacionario. El desplazamiento vertical de la superficie libre es una variable gaussiana, las crestas (picos positivos) y senos (picos negativos) entre dos pasos ascendentes por el nivel medio siguen una distribución de Rayleigh y, con amplia generalidad, el modelo de probabilidad de la altura de ola es Rayleigh de parámetro la altura de ola media cuadrática, u otro estadístico, p. ej. la altura de ola significativa, o su correspondiente en el dominio frecuencial proporcional a la raíz cuadrada del momento de orden cero del espectro de energía. Admitiendo la independencia estadística de las olas sucesivas, la altura de ola máxima en un estado con N olas sigue una distribución de Rayleigh elevada a la potencia N.

Bajo ciertos supuestos, las acciones del oleaje, los términos de la ecuación de verificación, y, en su caso, del margen y coeficiente de seguridad se pueden describir de forma análoga al oleaje. En algunos casos, en particular con ecuaciones de verificación no lineales, la serie temporal puede presentar otras escalas temporales, armónicos y subarmónicos de las frecuencias del oleaje.

Para facilitar la verificación resulta conveniente reducir el número de factores de proyecto que intervienen en los términos de la ecuación de verificación. En el caso de los métodos probabilistas, la ordenación de los factores contribuye a simplificar la aplicación de los métodos de verificación, mientras que en el caso de los métodos de verificación deterministas, la ordenación es estrictamente necesaria. Entre otros, se recomienda aplicar el procedimiento presentado en las secciones 4.7 y 4.8 de la ROM 0.0-01.

Asignación de valores y resultados en una verificación integrada (sistema de ecuaciones)

Para verificar simultáneamente los modos principales, por ejemplo de un subsistema, es necesario que todas sus ecuaciones se formulen en el mismo dominio temporal (estado meteorológico) y con el mismo método (Nivel I, II o III). La asignación de los valores en cada ecuación de verificación seguirá las pautas indicados anteriormente para cada ello.

La resolución del sistema indica si todos los modos de fallo del subsistema son, o no, seguros, en ese estado.

COMENTARIO

Formalmente, el procedimiento actual de verificación asume, (1) la independencia del comportamiento de cada modos principal, (2) no interacción entre ellos, incluso cuando alguno o algunos modos han iniciado y/o evolucionado la avería, y (3) la representatividad de una ecuación de verificación aunque se haya obtenido en condiciones diferentes a las del proyecto. La confianza en el resultado se apoya en admitir que, si los elementos que participan en cada uno de los modos se calculan con unos valores pésimos de los agentes predominantes, la estructura calculada es fiable. Es decir, se admite que el conjunto formado por los resultados “supuestamente pésimos” para cada modo, es un buen “punto” de diseño.

En el actual estado del arte es posible aplicar la verificación integrada, incluso, con niveles de avería diferentes para cada uno de los modos principales de un subsistema. La principal dificultad no reside en el procedimiento, si no en la selección coherente entre la amplia gama de ecuaciones con las que se pueden verificar cada modo de fallo, mayoritariamente obtenidas en ensayos ejecutados con criterios específicos (y diferenciados) de cada laboratorio.

La verificación integral por estados, incluso con los supuestos anteriores, con valores concomitantes de los agentes comunes y valores simultáneos para los agentes no comunes (asignados mediante un método de coeficientes parciales o apoyados en la función de probabilidad conjunta), ofrece una línea de diseño con mayor potencial para la optimización técnica-económica del tramo y la probabilidad conjunta de fallo asociada.

Si, además, esta verificación se apoya en una experimentación integrada, con ecuaciones compatibles y asignación de valores concomitantes (compatibles y simultáneos) de los agentes, acciones y términos, la fiabilidad del diseño y del cálculo de los costes totales debe ser mayor.

4.3 VERIFICACIÓN DE LOS MODOS A ESCALA DE TRAMO Y FASE DE PROYECTO

Para verificar el cumplimiento de los objetivos del dique a la escala de una fase de proyecto es necesario extender la verificación y, en su caso, la probabilidad de fallo o parada desde la escala del elemento en el espacio y del estado en el tiempo a la escala tramo en el espacio y fase de proyecto en el tiempo (ver Artículo 4.1.1).

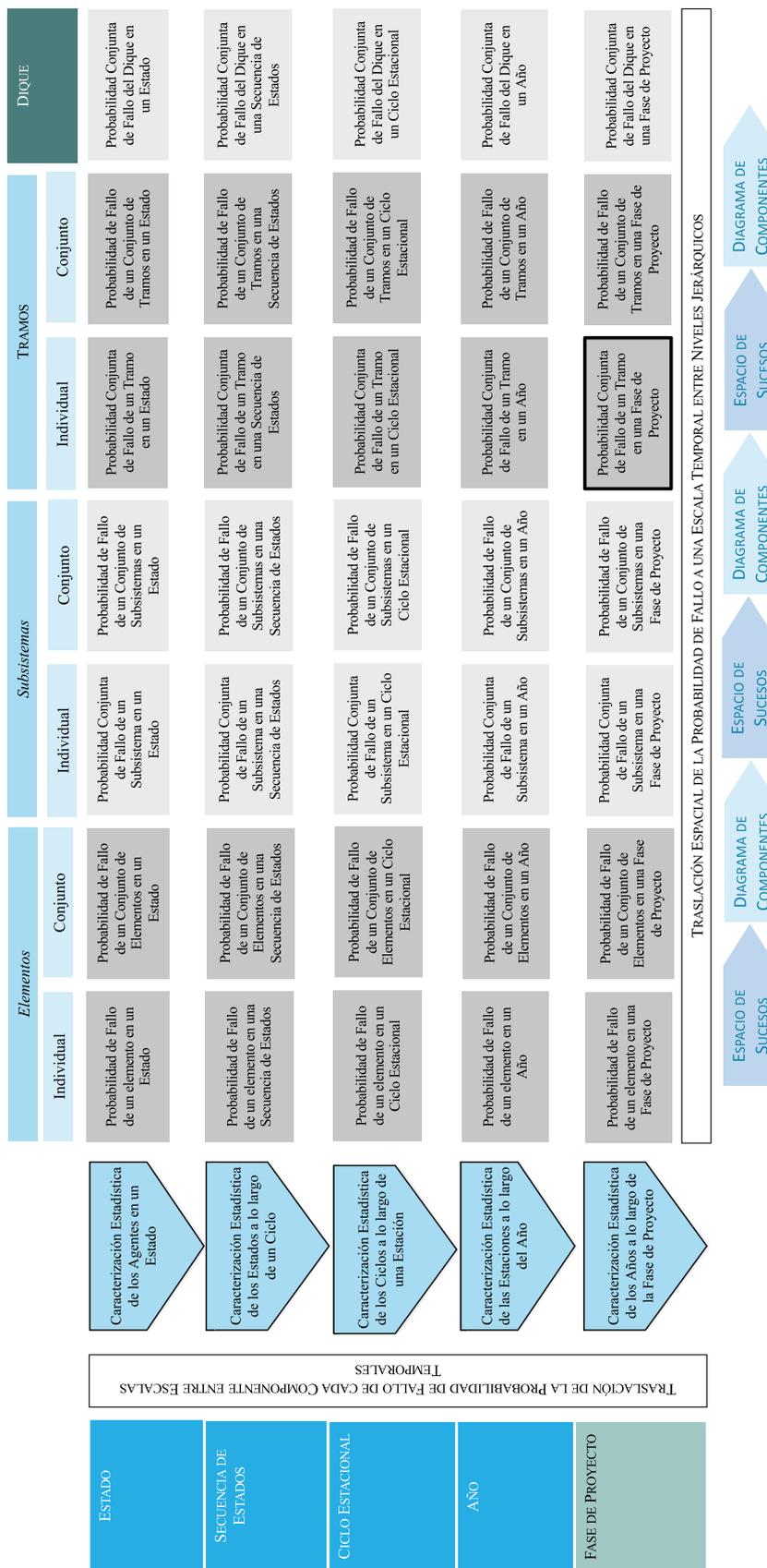
4.3.1 Escalas espacio-temporales para la verificación de los requisitos de proyecto

En esta ROM 1.1-18, entre otras, se propone, a partir del planteamiento y formulación en el estado, la siguiente secuencia de escalas temporales de trabajo:

- (a) Formato de la ecuación de estado y las variables de estado
- (b) Ciclo aleatorio de solicitud
- (c) Secuencia aleatoria de ciclos de solicitud
- (d) Grupos de años
- (e) Vida útil y otras fases de proyecto

Esta traslación depende, entre otros, del formato de la ecuación y de las variables de estado que participan y del método y del grado de desarrollo del proyecto. En particular, la evaluación de la probabilidad de fallo o parada a distintas escalas espaciales en un determinado intervalo de tiempo se debe apoyar en, (a) los modelos de probabilidad conjunta de los distintos modos de fallo o parada en el intervalo de tiempo considerado, (b) los criterios que describen las líneas de fallo, su progresión y desencadenamiento y (c) los diagramas de componentes que expresan las combinaciones de elementos del espacio de sucesos que suponen el incumplimiento de los requisitos de proyecto de los componentes de orden jerárquico superior.

Figura 4.1: Relaciones entre escalas para la verificación de un dique de abrigo



4.3.2 Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel I

Los métodos de Nivel I incluyen los métodos del coeficiente de seguridad global y de los coeficientes de seguridad parciales y se describen en el capítulo 5 de la ROM 0.0-01. En ambos casos los factores de proyecto y los valores de los términos se determinarán con criterios deterministas o semi-probabilistas.

Los métodos de Nivel I se apoyan en importantes simplificaciones de la realidad que se tienen en cuenta por medio de los coeficientes que afectan a los factores de proyecto que toman parte en los estados de cálculo. Con carácter general, no consideran la evolución de la avería y admiten la definición de estrategias de reparación en términos básicos (reparación inmediata o no reparación).

Selección de los estados de cálculo y condiciones de trabajo

Se formulará la ecuación de verificación para ciertos tipos de combinaciones de agentes y acciones que pueden intervenir en la ocurrencia del modo y que dependerán de las condiciones de trabajo (CT). Entre otras, se podrán considerar las siguientes (ROM 0.0-01, apartado 4.5):

- (a) CT_1 , operativas normales que incluyen los posibles estados en los que la probabilidad de parada operativa es muy pequeña o combinaciones de agentes concomitantes cuya acción tenga una probabilidad conjunta de fallo frente a la seguridad no despreciable.
- (b) CT_2 , extremas que integran todos los posibles estados en los que la probabilidad de fallo frente a la seguridad y la aptitud para el servicio no sea despreciable.
- (c) CT_3 , excepcionales que incluyen los posibles estados de proyecto relacionados cuya probabilidad de presentación es muy pequeña, significativamente menor que la correspondiente a las condiciones de trabajo extremas, debidas a razones excepcionales de uso y explotación, o por causas fortuitas del medio físico o accidentales. Éstas y las accidentales, en su caso, deben de ser objeto del correspondiente análisis de accidentalidad, tal y como se comenta en la Sección 5, Artículo 5.6.

La selección de los valores de proyecto de los agentes predominantes en formulaciones de tipo semi-probabilistas se atenderá a las siguientes consideraciones.

ESTADOS CARACTERÍSTICOS DE LAS CONDICIONES EXTREMAS O EXCEPCIONALES

Los estados se seleccionarán a partir de los regímenes extremos conjuntos de los agentes principales de cada modo. En ausencia de regímenes conjuntos podrá admitirse el uso de regímenes extremos marginales del agente preponderante y los condicionales de los dependientes de él.

La selección se realizará en función de la probabilidad de excedencia en la fase de proyecto, que deberá ser igual o inferior al valor de la probabilidad admitida como requisito de proyecto para el modo considerado en función del reparto de la probabilidad conjunta considerado.

La probabilidad de excedencia se definirá a partir de la superación de alguna o todas las variables consideradas, en función de su participación en la ocurrencia del modo.

ESTADOS CARACTERÍSTICOS DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS NORMALES

Los estados se seleccionarán a partir de los regímenes medios conjuntos de los agentes principales de cada modo de parada operativa. En ausencia de regímenes conjuntos podrá admitirse el uso de regímenes medios marginales del agente preponderante y los condicionales de los dependientes de él.

La selección se realizará en función de:

- (a) la probabilidad de excedencia en la fase de proyecto, que deberá ser igual o inferior al valor de la probabilidad admitida como requisito de proyecto para el modo de parada considerado en función del reparto de la probabilidad conjunta considerado,
- (b) la frecuencia y duración de las paradas, que deberán ser igual o inferior a los valores admitidos como requisitos de proyecto.

La probabilidad de excedencia se definirá a partir de la superación de alguna o todas las variables consideradas, en función de su participación en la ocurrencia del modo. Si las condiciones de trabajo se definen por las combinaciones de agentes concomitantes, la selección de los estados se hará en función de la compatibilidad de los límites y de los umbrales operativos que ocurran de forma simultánea.

Condiciones de compatibilidad y simultaneidad de las acciones

Las condiciones de compatibilidad y simultaneidad de las acciones en la verificación se pueden especificar mediante coeficientes de ponderación que, en general, dependen de las condiciones de trabajo en las que se encuadra el estado de verificación. Estos factores se ajustarán a lo recomendado en la ROM 0.0-01, capítulos 4 y 5 y, subsidiariamente, en la ROM 0.5-05 para los modos de fallo del terreno. En caso de no disponer de dichos factores, serán previamente calibrados para ajustarse a los requisitos de esta Recomendación. En el caso de factores de proyecto regulados por otras Normas e Instrucciones se determinarán según lo dispuesto en ellas.

Probabilidad conjunta frente a los modos principales

La resolución de la ecuación de verificación informa únicamente de si se produce o no el fallo o parada en el estado considerado, de acuerdo con su criterio de fallo o parada, sus hipótesis de aplicación y su incertidumbre.

Si las ecuaciones de verificación están formuladas con criterios deterministas el método no proporciona información sobre la probabilidad de incumplimiento de los requisitos de proyecto.

Si las ecuaciones de verificación están formuladas con criterios semi-probabilistas, la probabilidad de ocurrencia del modo en el intervalo de tiempo estará vinculada con los criterios adoptados para definir los valores representativos de los factores de proyecto, los coeficientes parciales y de seguridad considerados. En concreto, como aproximación en este grado de desarrollo, la probabilidad de excedencia del agente o agentes predominantes en la ocurrencia del modo podrá tomarse como la probabilidad de ocurrencia del mismo.

La probabilidad conjunta frente a los modos principales se calculará de acuerdo con los diagramas de componentes, en función de los siguientes aspectos:

- (a) La estructura jerárquica del dique.
- (b) Las relaciones lógicas que relacionan la ocurrencia de los modos con el fallo o parada del tramo: en serie (probabilidad de la intersección), en paralelo (probabilidad de la unión) o mixtas.
- (c) Las probabilidades de ocurrencia de cada modo en la fase de proyecto y sus relaciones de dependencia.
- (d) Las estrategias de reparación de la avería.

4.3.3 Recomendaciones para la verificación mediante métodos de Nivel II y III

Los métodos de Nivel II y Nivel III permiten evaluar la probabilidad de ocurrencia de un modo en un intervalo de tiempo a partir de los modelos estadísticos de los factores de proyecto que toman parte en la ecuación de verificación. Los métodos de Nivel II emplean un procedimiento simplificado que se apoya en transformaciones funcionales de dichos factores expresados como variables gaussianas, reducidas e independientes. Los métodos de Nivel III

evalúan aquella probabilidad integrando (analítica o numéricamente) una función multidimensional en el dominio de ocurrencia de los modos.

Para la verificación de los requisitos de proyecto mediante métodos probabilísticos se considerarán las siguientes opciones,

- (a) secuencias de eventos (Niveles II o III),
- (b) simulación no estacionaria (Nivel III).

Secuencias de eventos

Este procedimiento se apoya en la división de la fase de proyecto en secuencias de eventos (intervalos de tiempo) independientes, característicos de las condiciones extremas (verificación de la fiabilidad) o normales operativas (verificación de la operatividad) que solicitan al modo. El número de eventos de este tipo en la fase de proyecto podrá ser una variable determinista (por ejemplo, si se aplica el método de los máximos por bloques) o una variable aleatoria (por ejemplo, si se aplica el método de máximos por ciclos de solicitud o calma), ver capítulo 7 de la ROM 0.0-01.

La secuencia de aplicación de este procedimiento se podrá ajustar a lo que sigue:

1. Caracterización de la distribución conjunta de los factores de proyecto en las condiciones pésimas (habitualmente picos) para la no ocurrencia del modo considerado.
2. En el caso de que el número de eventos en la fase de proyecto sea una variable aleatoria, caracterización de su función de probabilidad.
3. Resolución de la probabilidad de ocurrencia del modo en uno de estos eventos mediante métodos de Nivel II o III.
4. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia del modo de fallo en una fase de proyecto considerando su probabilidad de ocurrencia en un evento y el modelo de probabilidad del número de eventos en dicha fase.
5. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia del modo de parada a lo largo de una fase de proyecto considerando, además de lo anterior, la duración del intervalo de tiempo en que se mantienen las condiciones de parada.

VERIFICACIÓN EN LA VIDA ÚTIL

La probabilidad conjunta frente a los modos principales se calculará de acuerdo con los diagramas de componentes, en función de los siguientes aspectos:

- (a) La estructura jerárquica del dique.
- (b) Las relaciones lógicas que relacionan la ocurrencia de los modos con el fallo o parada del tramo: en serie (probabilidad de la intersección), en paralelo (probabilidad de la unión) o mixtas.
- (c) Las probabilidades de ocurrencia de cada modo en la fase de proyecto y sus relaciones de dependencia.
- (d) Las estrategias de reparación de la avería.

COMENTARIO

Esta aproximación no incluye la secuencia temporal de ocurrencia y propagación de los modos ni las dependencias temporales entre los posibles sucesos (por ejemplo, desencadenamientos, esperas, etc.). Las estrategias de conservación y reparación se especifican de forma simple (por ejemplo binaria, no reparación / reparación inmediata).

Simulación no estacionaria de la fase de proyecto

Este procedimiento permite incorporar al resultado la evolución de la avería y su propagación espacial así como el resultado de las estrategias de conservación y reparación. Se apoya en, (a) la generación de secuencias de estados que comprendan la totalidad de la fase de proyecto y (b) la resolución de la ecuación de verificación de cada modo en todos ellos. La verificación del cumplimiento de los requisitos de proyecto se afectará atendiendo al siguiente esquema:

1. Generación de series temporales de variables cinemáticas y dinámicas del agua y sus acciones, velocidad, aceleraciones y presiones.
2. Generación de secuencias de olas y de acciones integradas en la fase (periodo) del oleaje.
3. Generación de secuencias de variables, agentes y acciones de estados.
4. Verificación en cada estado de (a) todos los modos de fallo o parada, (b) propagación de la avería y desencadenamiento de nuevos modos y (c) progreso de la reparación.
5. Verificación de los requisitos de proyecto en la vida útil.

A partir de los modelos de probabilidad de los agentes, se generan numéricamente secuencias de estados en las que los descriptores de las distintas variables se ajusten a, (a) sus distribuciones conjuntas de probabilidad, (b) sus escalas de variabilidad temporal incluyendo las tendencias previsible debidas al calentamiento global y (c) la dependencia temporal entre los valores que toman en cada estado con los anteriores.

El dominio temporal de las simulaciones debe ser, con carácter general, la fase de proyecto a verificar. No obstante, para evitar un número excesivo de comprobaciones, para la verificación de la fiabilidad y de la operatividad es suficiente simular, únicamente, secuencias de ciclos de solicitación y de calma, respectivamente. En estos casos debe caracterizarse adecuadamente la frecuencia de presentación de los ciclos y el intervalo de tiempo entre ellos con sus correspondientes escalas de variación temporal.

VERIFICACIÓN DEL TRAMO Y DIQUE POR SECUENCIA DE ESTADOS

La verificación de la obra “estado por estado” se efectuará mediante un proceso secuencial que contendrá, al menos, los siguientes elementos,

- (a) Transformación de los agentes en presencia de la obra.
- (b) Verificación de las condiciones de operatividad del tramo (ver Artículo 2.3.2).
- (c) Verificación del inicio de la avería en los distintos modos y progresión de la misma (ver Artículos 2.3.2 y 2.4.1).
- (d) Progresión espacial de la avería y desencadenamiento de otros modos (ver Artículo 2.6).
- (e) Evaluación de las consecuencias del fallo de cada componente en los de orden jerárquico superior (ver Artículo 2.3.4).

Asimismo, definida la estrategia de reparación, se evaluará si se dan las condiciones para iniciar los trabajos, y, en su caso, si estos pueden desarrollarse atendiendo a los criterios de disponibilidad de medios, operatividad de la maquinaria, etc. (ver Artículo 3.7).

COMENTARIO

Se debe procurar que los valores asignados a los factores de proyecto de las ecuaciones de verificación y la evolución de la avería en los distintos modos sean consistentes entre sí. Tal y como se ha comentado anteriormente, en cada estado se verificará de forma simultánea el conjunto de modos principales del subsistema. Esta forma de proceder implica que los valores de los agentes climáticos y del terreno que interaccionan con el dique son los mismos y que los valores que intervienen en sus respectivas ecuaciones de verificación se determinan localmente teniendo en cuenta su posición y la tipología del tramo.

VERIFICACIÓN EN LA VIDA ÚTIL

En cada simulación se obtendrá el resultado de la verificación de los distintos requisitos de proyecto: un suceso de Bernoulli que indique si se ha producido o no el fallo del tramo, la proporción de tiempo en el que el tramo ha estado en explotación y el número medio de paradas en un intervalo de referencia (habitualmente un año). Se simulará un número suficiente de repeticiones de la fase de proyecto como para asegurar el grado de significación estadística requerido. Con el conjunto de resultados se constituirá una muestra de valores independientes.

Una estimación de la probabilidad conjunta de fallo (o de parada) en la vida útil es la frecuencia relativa de fallos (o de parada) en las simulaciones efectuadas.

4.3.4 Verificación de condiciones de trabajo excepcionales, CT_3

La verificación de un diseño de dique a condiciones de trabajo excepcionales tiene tratamientos específico y diferenciados según su causa. Si las causas están previstas $CT_{3,2}$, en general por razones de uso y explotación se debe verificar la obra, reforzando temporalmente, la estructura. Los valores simultáneos y compatibles de los agentes y de las acciones en la ecuación de verificación se adoptarán en función del carácter de la obra y del dispositivo dispuesto para su control.

Con carácter general, en las costas españolas no es necesario verificar el dimensionamiento del dique frente a los agentes sísmico y maremoto (ver ROM 1.0-09). No obstante, dependiendo del carácter de la obra y del Proyecto de Inversión, puede ser necesario dimensionar y verificar el dique y sus tramos frente a un sismo o un maremoto, adscritos ambos agentes, habitualmente, a las condiciones de trabajo excepcionales fortuitas del medio físico $CT_{3,1,1}$. En estas condiciones, se debe verificar, al menos, los siguientes modos de fallo ubicados en las tres partes del dique,

- (a) Cimentación y terreno y cuerpo central: deslizamiento superficial y profundo.
- (b) Cuerpo central y superestructura: rebase sin fallo de la superestructura y sus consecuencias (sobre el talud interior, muelle, etc.), y
- (c) Superestructura: deslizamiento y vuelco de la superestructura.

considerando las acciones debidas a presiones dinámicas durante la presentación del terremoto o la arribada de un maremoto. Para su planteamiento y formulación se tendrá en cuenta lo recogido en la ROM 0.5-05.

Los valores de proyecto del agente sísmico se adecuarán a la normativa vigente en España. Las características hidrodinámicas del maremoto se seleccionarán en función de los requerimientos de las condiciones de trabajo excepcionales.

La probabilidad de excedencia del valor de cada uno de los agentes (sismo y maremoto) será inferior a 10^{-4} para su consideración como modo no principal. En otro caso se deben especificar a priori las condiciones del diseño teniendo en cuenta (a) las características de la obra, (b) la probabilidad de ocurrencia del sismo o maremoto y (c) la fiabilidad y operatividad mínimas que se deben garantizar una vez transcurrido el evento.

En función del carácter de la obra y del Proyecto de Inversión puede ser necesario verificar las condiciones de trabajo excepcionales fortuitas accidentales, $CT_{3,1,2}$. Tal y como se recoge en la Sección 5, Artículo 5.6, esta verificación debe realizarse en el ámbito de un estudio de accidentalidad.

EJEMPLO

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DEL MARGEN DE SEGURIDAD EN UN DIQUE CON CÁMARA OSCILANTE FRONTAL

En un estado meteorológico, el oleaje en el emplazamiento varía a lo largo del tiempo. El flujo de agua y las fuerzas en los tramos, partes y elementos del dique también. Las fórmulas para determinar su valor, las ecuaciones

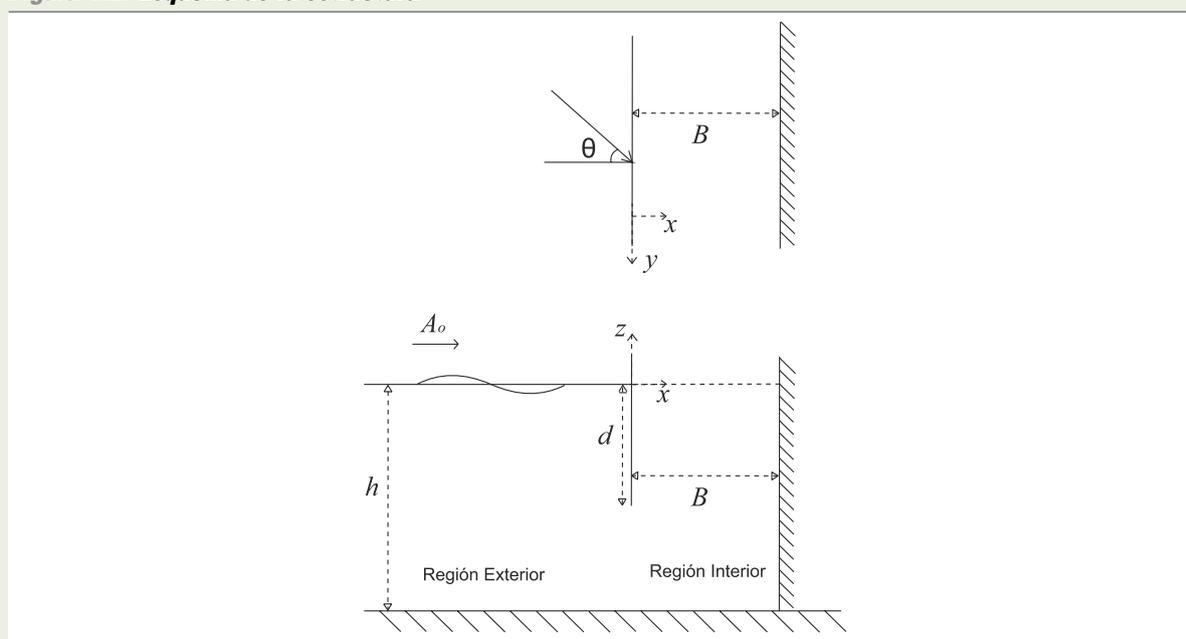
ciones de verificación de los correspondientes modos de fallo y de parada y su resolución se pueden plantear a diferentes escalas de variabilidad temporal de los agentes y las acciones.

A modo de ejemplo, se considera un dique de abrigo especial infinitamente largo (eje y) formado por una placa vertical, delgada e impermeable, a una distancia B de una pared vertical impermeable. Aquella, con una sumergencia relativa ($d/h = 0.64$), separa la región exterior (región 1) de la región interior (región 2), como se observa en la figura 4.2. El francobordo de la placa y de la pared es el necesario para que el movimiento vertical de la columna de agua en ambas regiones no esté limitado. La profundidad de agua es constante en todo el dominio de trabajo (figura 4.2).

Comportamiento hidrodinámico y modelo de cálculo

El oleaje que incide con oblicuidad en la placa se refleja en ella y se transmite a la región interior por el hueco bajo la placa delgada. Allí se refleja en la pared vertical; una parte de la energía reflejada se escapa (irradia) hacia la región exterior y otra se re-refleja hacia la pared, y así sucesivamente. El flujo oscilatorio para pasar a un lado y otro de la placa converge y diverge alternativamente, formando vórtices y disipando energía en el proceso.

Figura 4.2: Esquema de la estructura



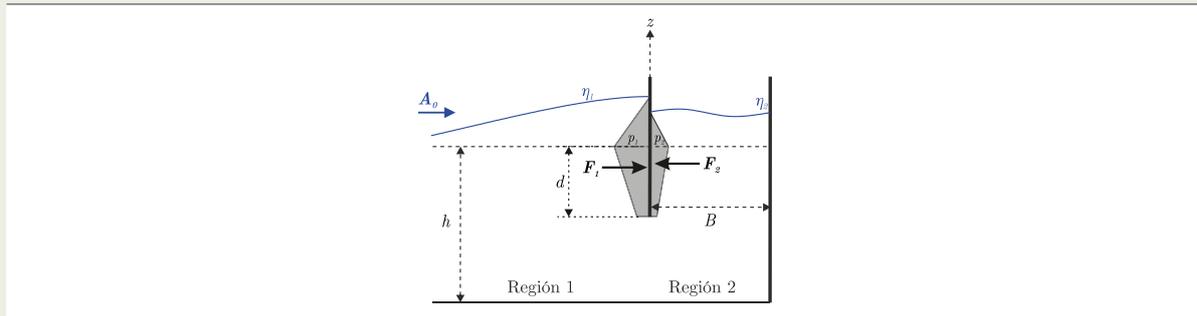
El comportamiento hidrodinámico del sistema se obtiene mediante la resolución del problema de contorno de las ecuaciones de la conservación de masa en ambas regiones, las condiciones de contorno en la superficie libre y en el fondo y las condiciones de compatibilidad del flujo en el hueco considerando la disipación de energía. El problema se resuelve para cada una de las componentes sinusoidales de fase aleatoria, cada una de ellas caracterizada por una frecuencia y amplitud, de un espectro de energía tipo JONSWAP.

El resultado del modelo es la variación temporal de la superficie libre del mar en las regiones exterior, $\eta_1(t)$, e interior, $\eta_2(t)$. Aplicando la teoría lineal de ondas, se determina la evolución temporal del campo de presiones, $p_k(z, t)$, a un lado y otro de la placa en función de la superficie libre η_k ,

$$P_k(z, t) = \begin{cases} \rho\omega g \left(\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \eta_k - z \right) & z < 0 \\ \rho\omega g (\eta_k - z) & z > 0 \end{cases} \quad k = 1, 2 \quad (4.3)$$

donde $k = 1, 2$ identifican las regiones exterior e interior, respectivamente.

Figura 4.3: Esquema de las variables hidrodinámicas de estudio



Integrando las respectivas leyes de presiones de cada región en $x = 0$ (ecuación 4.3), desde el pie de la placa, a la profundidad d , hasta la superficie libre η_k , se obtiene la evolución temporal de la fuerza por unidad de anchura en cada una de ellas (figura 4.3). La evolución temporal de la fuerza resultante o total sobre la placa se obtiene como la diferencia de ambas fuerzas,

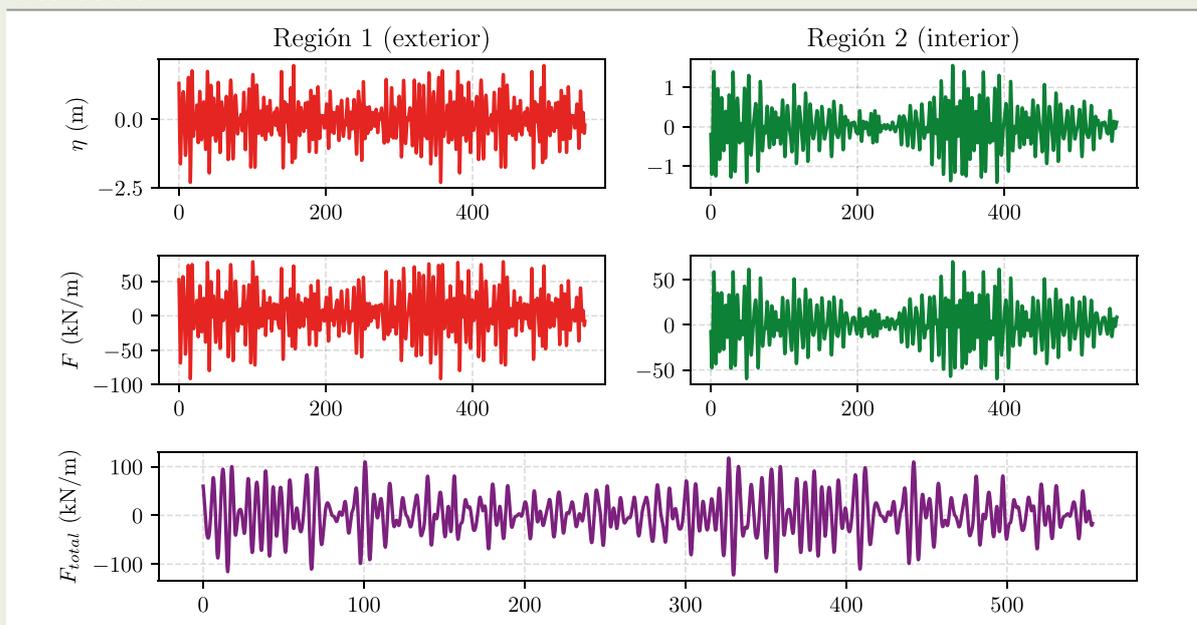
$$F_t(t) = F_1(t) - F_2(t) = \int_{-d}^{\eta_1} P_1(z, t) dz - \int_{-d}^{\eta_2} P_2(z, t) dz \quad (4.4)$$

El sentido de la fuerza total, $F_t(t)$, oscila hacia tierra - hacia mar en función del desfase (diferencia) de los desplazamientos verticales de la superficie libre a un lado y al otro de la placa. En la serie temporal de la fuerza se pueden identificar los pasos ascendentes por cero y, en el intervalo de tiempo que transcurre entre dos ceros consecutivos, tomar el mayor pico positivo (sentido hacia tierra, F_{tierra}), y el mayor pico negativo (sentido hacia mar, F_{mar}).

Modelos de probabilidad y descriptores de estado

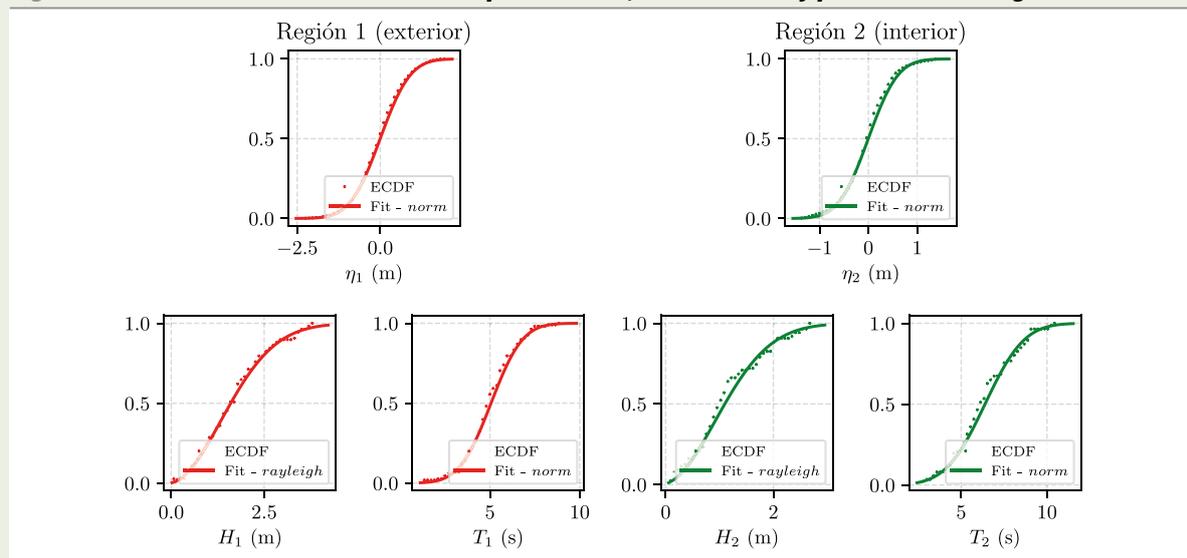
A modo de ejemplo, se genera un registro temporal de oleaje irregular caracterizado según un espectro tipo JONSWAP con $\gamma = 1$ a una profundidad de 10 m, con periodo medio del oleaje $T_z = 11$ s, altura de ola significativa $H_{m0} = 7$ m y duración ≈ 3000 s (350 olas). La figura 4.4 muestra el registro temporal de elevación de la superficie libre y fuerza en las dos regiones, así como la fuerza total durante los primeros 700 s.

Figura 4.4: Series temporales de superficie libre y fuerza en las regiones definidas y de fuerza total sobre la estructura



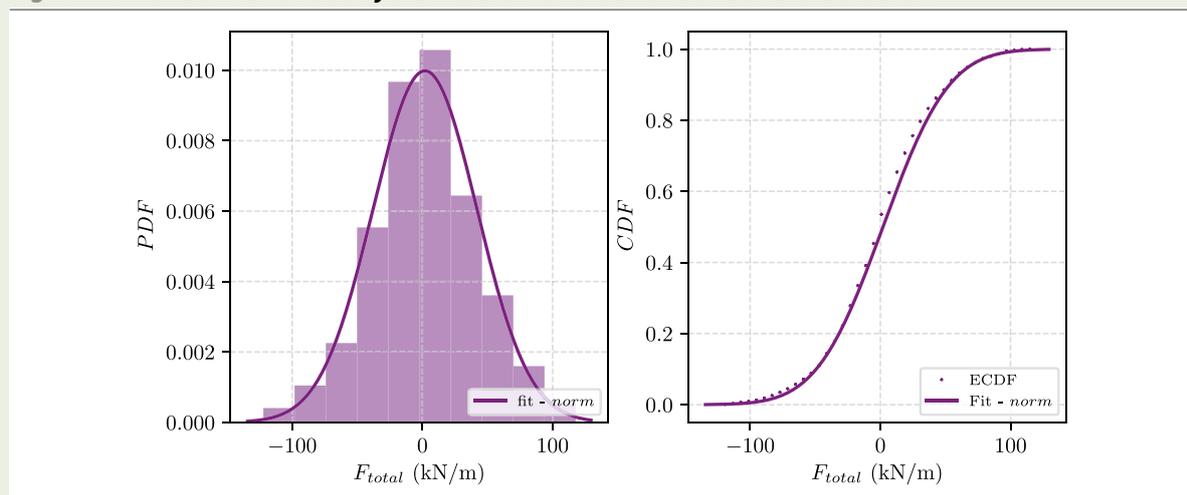
Como se observa en la figura 4.5, el desplazamiento vertical de la superficie libre en ambas regiones tiene un comportamiento gaussiano ($\sigma_{\eta_1} = 1.49$ y $\sigma_{\eta_2} = 1.2$). La función de distribución de la altura de ola en cada región se ajusta a una función de distribución tipo Rayleigh ($\sigma_{H_1} = 2.91$ y $\sigma_{H_2} = 2.13$). El número de olas individuales en las regiones exterior e interior es 358 y 342, ligeramente superior e inferior al número de olas del tren incidente, respectivamente.

Figura 4.5: Funciones de distribución de superficie libre, alturas de ola y periodos en las regiones definidas



La fuerza resultante es la diferencia de dos variables aleatorias gaussianas, por lo que es también una variable gaussiana ($\mu_{F_t} = 5.83$ y $\mu_{F_t} = 112.93$), como se observa en la figura 4.6.

Figura 4.6: Función de densidad y distribución de la fuerza total sobre la estructura



Los picos positivo y negativo de la fuerza resultante, obtenidos mediante la identificación de pasos ascendentes por cero (figura 4.7), se ajustan a una función bi-paramétrica de Weibull de parámetros de forma y escala ($k_{F_{tierra}} = 1.47$, $\lambda_{F_{tierra}} = 157.64$) y ($k_{F_{mar}} = 1.52$, $\lambda_{F_{mar}} = 145.78$), respectivamente (figura 4.8). El valor del parámetro de forma es inferior al correspondiente de la función de Rayleigh, $k = 2$. El número de pasos ascendentes por cero en la serie de fuerzas temporales es, aproximadamente igual al de olas, 350.

Figura 4.7: Pasos ascendentes por cero en la serie temporal de la fuerza total y picos positivos (hacia tierra) y negativos (hacia mar) en cada uno de ellos

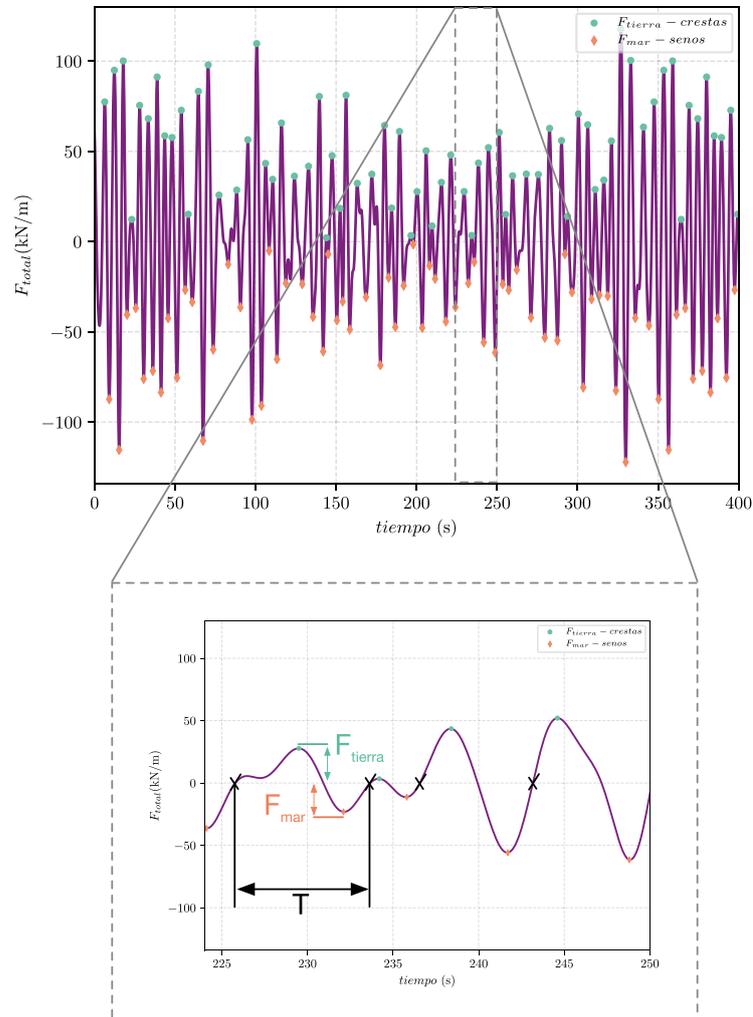
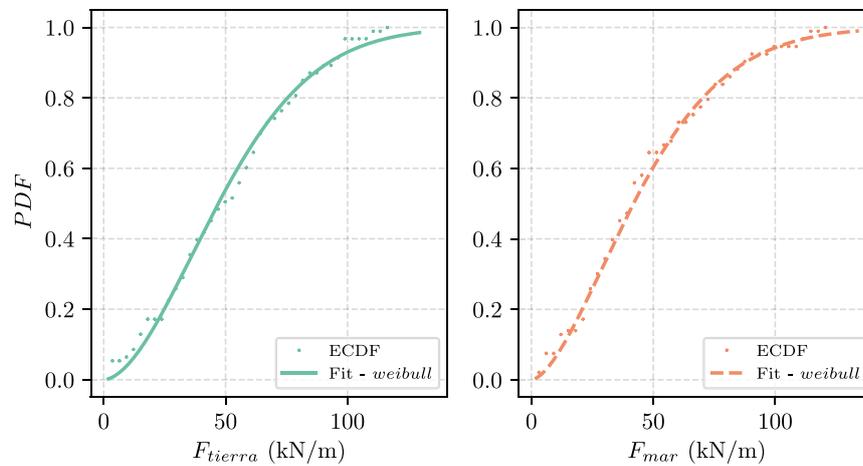


Figura 4.8: Función de distribución de los picos de fuerza hacia tierra y hacia el mar

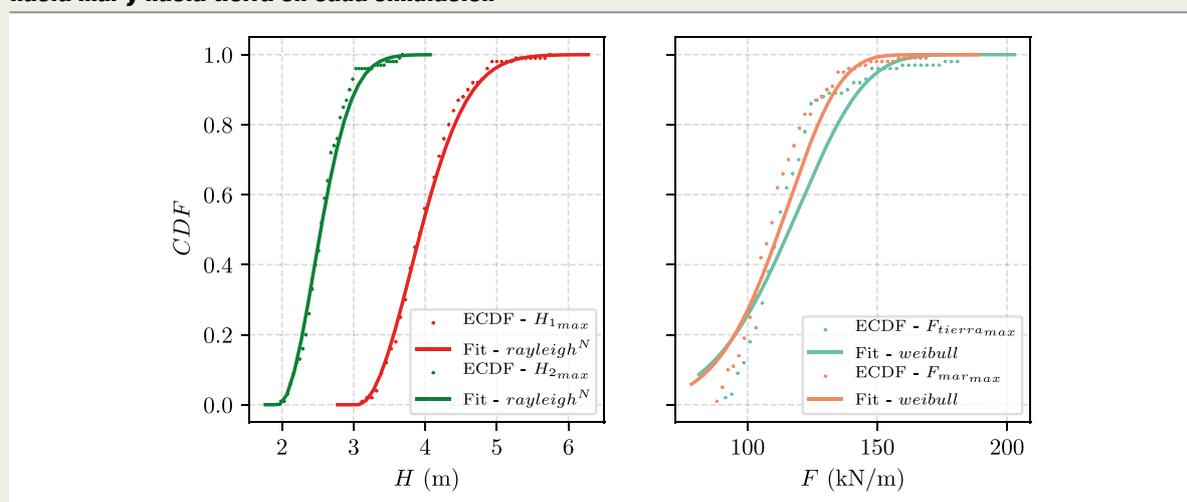


Comparando las series temporales de los desplazamientos verticales en cada región con la serie temporal de la fuerza resultante, se observa que los picos sobre la estructura (F_{tierra} y F_{mar}) no son concomitantes con los picos de la superficie libre a ambos lados de la placa. La fuerza a ambos lados de la placa se ajusta a una función de distribución tipo Weibull con parámetro de forma $k \approx 1:5$.

Fuerza máxima hacia tierra y hacia mar

La simulación de M registros temporales del oleaje permite obtener una muestra de valores de las variables aleatorias $F_{tierra_{max}}$ (fuerza máxima “hacia tierra” en cada simulación) y $F_{mar_{max}}$ (fuerza máxima “hacia mar” en cada simulación). Los valores de ambas muestras siguen una distribución de Weibull (figura 4.9) de parámetros de ($k_{F_{tierra_{max}}} = 7.07, \lambda_{F_{tierra_{max}}} = 357.12.09$) y ($k_{F_{mar_{max}}} = 7.12, \lambda_{F_{mar_{max}}} = 335.99$).

Figura 4.9: Funciones de distribución de los valores máximos de altura de ola y de las fuerzas máximas hacia mar y hacia tierra en cada simulación



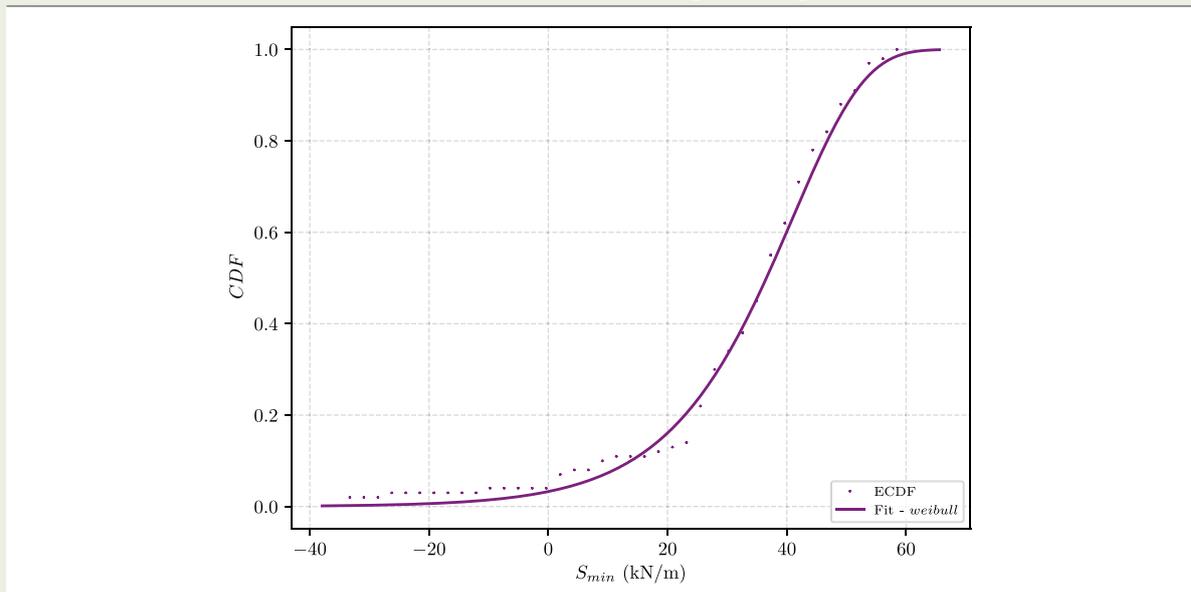
Ecuación de verificación

Si los picos de la fuerza total hubiesen sido Rayleigh, la distribución del pico máximo hacia tierra y del pico máximo hacia mar en M picos hubiese sido $F(Rayleigh)^M$. Una ecuación de verificación del modo de fallo a cortante de la placa frontal, formulada como margen de seguridad (diferencia entre los términos favorables y los desfavorables) es,

$$S = r - F_c \quad (4.5)$$

donde S es el margen de seguridad, que debe ser positivo y define el fallo, r es la resistencia a cortante de la placa y F_c es el valor de cálculo de la fuerza máxima hacia tierra o hacia mar. Considerando r constante e igual a 150 kN/m, se calcula el valor mínimo del margen de seguridad en cada simulación, junto con la función de distribución de mejor ajuste Weibull $k_{S_{min}} = 2.89, \lambda_{S_{min}} = 128.8$. La probabilidad de que $S \leq 0$ durante la ocurrencia del estado meteorológico es 0.06. La probabilidad de fallo de la placa a cortante es la probabilidad de que $S \leq 0$ condicionada a que en un intervalo de tiempo (vida útil) se exceda, al menos una vez, el estado meteorológico de cálculo.

Figura 4.10: Función de distribución del valor mínimo del margen de seguridad en cada simulación



El planteamiento del problema y su resolución se detallan en [Jalón et al., 2018](#).

4.4 MÉTODOS DE VERIFICACIÓN Y GRADO DE DESARROLLO DEL PROYECTO

El método de verificación depende del carácter del tramo y del grado de desarrollo del proyecto. De acuerdo con el apartado 4.10.4 de la ROM 0.0-01, el método de verificación del Proyecto de Construcción dependerá del carácter, IRE e ISA, de los tramos de la obra. Si hay métodos diferentes según el tramo, el método de verificación del Proyecto de Construcción del dique será el correspondiente al tramo con valores más altos de IRE e ISA. En la tabla 4.6 se especifica el método de resolución recomendado en función de los índices IRE e ISA.

Tabla 4.6: Método de resolución recomendado según el carácter general del tramo

IRE	ISA			
	No significativo	Bajo	Alto	Muy Alto
Bajo	[1a]	[1b]	[1b] y [2] o [3]	[1b] y [2] o [3]
Medio	[1b]	[1b]	[1b] y [2] o [3]	[1b] y [2] o [3]
Alto	[1b] y [2] o [3]			

donde

- ◆ Nivel I: [1a] Coeficiente de seguridad global o del margen de seguridad, [1b] Coeficientes parciales,
- ◆ Nivel II: [2] Momentos estadísticos y técnicas de optimización,
- ◆ Nivel III: [3] Integración y simulación numérica.

COMENTARIO

Los métodos de Nivel I, II y III son, por lo general, de complejidad creciente pero de incertidumbre decreciente. Los métodos indicados deben entenderse como los mínimos recomendados pero, en el caso de disponer de información y de tener experiencia, la obra podrá verificarse por un método de mayor nivel. Asimismo, el uso de un método de Nivel I está recomendado en todos los casos, al menos durante los grados de desarrollo iniciales, como punto de partida para el diseño y los análisis de sensibilidad, y como elemento de referencia para evaluar los resultados.

4.4.1 Métodos de verificación según el grado de desarrollo del proyecto

El método de verificación en cada grado de desarrollo dependerá, a su vez, del carácter de la obra, y de la clase de proyecto (figura 1.8, Sección I, Artículo 1.4.1).

Para proyectos de IRE e ISA medios y bajos y para los que no sea necesario elaborar un Proyecto de Inversión (proyectos Clase I), los Estudios Previos y el Estudio de Alternativas y de Soluciones se pueden verificar mediante métodos de Nivel I. Este último estudio conduce directamente a la elaboración del Proyecto de Construcción y su ejecución mediante estos mismos métodos.

Para los proyectos de IRE e ISA alto y para los que sea necesario elaborar el Proyecto de Inversión (proyectos Clase II), los Estudios Previos y el Estudio de Alternativas y de Soluciones se pueden verificar por métodos de Nivel I. Seguidamente, el Anteproyecto y el Proyecto de Construcción de la solución adoptada debe ejecutarse, además, por métodos de Nivel II o III. En estos casos se debe de analizar y comparar los diseños elaborados por Nivel I con los métodos probabilistas por el Nivel II o III.

Formulación en los métodos de Nivel I

Si los agentes predominantes son los climáticos y sísmicos, la formulación determinista sólo se debe aplicar en los Estudios Previos, con valores nominales seleccionados de su modelo de probabilidad, bien acotando la probabilidad de excedencia, bien por otro criterio equivalente. Para otros grados de desarrollo, la formulación de los agentes y acciones predominantes climáticos y sísmicos debe ser semi-probabilista.

4.4.2 Hipótesis de trabajo y simplificaciones según el grado de desarrollo

Para diques en los que, además del Nivel I, se recomienda la verificación del Proyecto de Construcción por métodos probabilistas (Nivel II o III) se podrán adoptar las siguientes hipótesis de trabajo y simplificaciones. Para métodos de Nivel I se adoptarán las simplificaciones adicionales pertinentes y en coherencia con el grado de desarrollo.

Estudios Previos**HIPÓTESIS DE TRABAJO**

En los Estudios Previos se considerarán, al menos, las siguientes hipótesis de trabajo:

- (a) Se definirán las relaciones entre el fallo de los distintos niveles jerárquicos de la obra por medio de diagramas de componentes, así como las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia.
- (b) La verificación se efectuará de forma simultánea en la totalidad del conjunto de modos principales, agrupados por su distribución espacial y localización de acuerdo con la jerarquía de tramos y subsistemas.
- (c) Los valores de los agentes que toman parte en las ecuaciones de verificación serán el resultado de la interacción de los incidentes con los distintos tramos y subsistemas de la obra.

A los efectos de comparación de los diseños por Nivel I y Nivel II o III, para aplicar el método de Nivel I se adoptarán las simplificaciones adicionales pertinentes, en coherencia con el grado de desarrollo del proyecto.

HIPÓTESIS SIMPLIFICADORAS

Para la ejecución de los Estudios Previos, se podrán aplicar las siguientes hipótesis simplificadoras:

- (a) La verificación de los elementos de la alineación principal podrá efectuarse con un número reducido de modos (dominantes) y atendiendo, en los restantes, a la aplicación de normas de buena práctica.
- (b) El fallo de un componente supondrá, a todos los efectos, su destrucción y la necesidad de reconstrucción del tramo para recuperar la satisfacción de los objetivos de proyecto.
- (c) La probabilidad de ocurrencia de un modo dominante podrá considerarse igual a la probabilidad de presentación de los agentes predominantes que producen dicho modo.
- (d) Las estrategias de reparación se podrán definir en términos simples de reparación inmediata o no reparación.
- (e) En los tramos diferentes a la alineación principal bastará con verificar el cumplimiento de normas de buena prácticas en las relaciones geométricas con la alineación principal y las características físicas del tramo.
- (f) Se consideran los potenciales efectos del calentamiento global de forma simplificada adoptando valores razonables del nivel del mar en función de la vida útil del dique y de las estimaciones de los organismos competentes.
- (g) El avance de los trabajos de construcción y sus costes se podrán considerar únicamente dependientes de la tipología del tramo y sus dimensiones.

Para cada forma en planta y tipología consideradas se definirán los modos de fallo principales y sus relaciones con el fallo del conjunto del tramo se plasmarán por medio de un diagrama de componentes (ver Artículo 2.3.4). Entre los modos principales se identificarán los dominantes. El reparto de la probabilidad de fallo en la vida útil se efectuará entre los modos dominantes atendiendo al diagrama de componentes definido y a las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia entre modos, en su caso, haciendo uso de cotas debidamente justificadas (ver Artículo 3.5).

VERIFICACIÓN DE LA FIABILIDAD

La verificación se podrá efectuar mediante métodos de Nivel I en un número reducido de estados característicos en condiciones de trabajo extremas a las que estará sometida la obra. Se seleccionarán de tal forma que la probabilidad de fallo en la vida útil del modo considerado sea inferior a la obtenida del reparto de probabilidades. En todo caso, los valores de los agentes predominantes serán representativos de su interacción con el dique y los valores de otros agentes deberán ser simultáneos y compatibles con los estadísticos del agente predominante.

En cada estado característico se verificará de forma simultánea la totalidad del conjunto de modos de fallo principales. Sustituyendo los valores en la ecuación de verificación, su resolución proporciona el valor del margen de seguridad. Si este valor es negativo (fallo del modo) se puede admitir que la probabilidad de superación del valor del agente predominante es una medida de la probabilidad de ocurrencia del modo. Aplicando el mismo método para los otros modos dominantes se podrá verificar si el diseño del tramo cumple, o no, con el reparto de probabilidades establecido y las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia empleadas para su definición.

VERIFICACIÓN DE LA OPERATIVIDAD

La ecuación de verificación será una ecuación de estado que fija la relación entre los valores umbrales de los agentes por encima o por debajo de los cuales se declara el cese de las actividades relacionadas con el modo de parada considerado. Mediante el análisis del régimen medio de los agentes se estimará el número medio de paradas operativas anuales y la duración del conjunto de ellas.

VERIFICACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Se podrán considerar costes y plazos medios de construcción en función de la tipología y sus dimensiones y mediante procedimientos estándar. Los valores obtenidos se podrán ponderar, entre otros, en función de la rigurosidad del clima marítimo en la zona y la incertidumbre en la respuesta del terreno.

Estudio de Alternativas y de Soluciones

En este grado de desarrollo algunas hipótesis de trabajo y simplificaciones son específicos de una u otra Clase de proyecto.

HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se considerarán, al menos, las siguientes hipótesis de trabajo:

- (a) Se definirán las relaciones entre el fallo de los distintos niveles jerárquicos de la obra por medio de diagramas de componentes, así como las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia.
- (b) La verificación se efectuará de forma simultánea en la totalidad del conjunto de modos principales, agrupados por su distribución espacial y localización de acuerdo con la jerarquía de tramos y subsistemas.
- (c) Los valores de los agentes que toman parte en las ecuaciones de verificación serán el resultado de la interacción de los incidentes con los distintos tramos y subsistemas de la obra.

Además, en proyectos de Clase I y para cada solución seleccionada,

- (a) Con carácter general, la avería de los distintos modos podrá progresar en el tiempo desde un valor de inicio hasta otro de fallo o destrucción, y esta evolución se caracterizará mediante el correspondiente modelo de acumulación del daño.
- (b) Se considerará la evolución espacial de la avería mediante diagramas de desencadenamiento y propagación.

HIPÓTESIS SIMPLIFICADORAS

Se podrán aplicar las siguientes hipótesis simplificadoras:

- (a) La verificación de los elementos de los distintos tramos de dique se podrá efectuar con un número reducido de modos (dominantes) y atendiendo, en los restantes, a la aplicación de normas de buena práctica.
- (b) El comportamiento del tramo se puede cuantificar para diferentes niveles de avería y su evolución a lo largo de un ciclo de solicitud mediante el ajuste de modelos estándar.
- (c) La avería no se propaga entre modos o componentes.
- (d) Si un ciclo de solicitud provoca el inicio de la avería pero no el fallo total, se podrá admitir la posibilidad de reparar el tramo antes de la llegada del siguiente. En tal caso, la operatividad, rendimiento y coste de los equipos deberá adaptarse a dicha hipótesis.
- (e) La probabilidad de ocurrencia de un modo dominante podrá considerarse igual a la probabilidad de presentación de un ciclo de solicitud de los agentes predominantes que producen dicho modo.
- (f) Los costes de la reparación se podrán estimar a partir del nivel de avería alcanzado en los modos en los que no se produzca el fallo.
- (g) Se consideran los potenciales efectos del calentamiento global de forma simplificada adoptando valores razonables del nivel del mar en función de la vida útil del dique y de las estimaciones de los organismos competentes.
- (h) La frecuencia de superación de los umbrales de operatividad de los medios constructivos puede emplearse para estimar los rendimientos efectivos de los trabajos.

Para cada alternativa considerada se definirán los modos de fallo principales y se propondrán distintas relaciones de fallo entre los niveles jerárquicos del dique, que se plasmarán por medio de un diagrama de componentes (ver

Artículo 2.3.4). Entre los modos principales se identificarán los dominantes. El reparto de la probabilidad de fallo en la vida útil se efectuará entre los modos dominantes atendiendo a distintos diagramas de componentes y a las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia entre modos, definidos según lo indicado en el Artículo 3.5. En su caso, se podrá hacer uso de cotas de la probabilidad conjunta debidamente justificadas.

Además, en proyectos de Clase II y para cada solución seleccionada,

- (a) Podrá admitirse que la evolución y propagación del daño se produce durante los ciclos de sollicitación.
- (b) La evolución temporal del daño de los modos principales se podrá ajustar a modelos analíticos estándar.
- (c) La evaluación de las estrategias de reparación podrá efectuarse modelando los periodos de calma entre ciclos de sollicitación mediante hipótesis simples.
- (d) Se consideran los potenciales efectos del calentamiento global basados en los escenarios futuros propuestos por los organismos competentes y teniendo en cuenta el ciclo vital del dique de abrigo.
- (e) La frecuencia de superación de los umbrales de operatividad de los medios constructivos pueden emplearse para estimar una medida global de los rendimientos efectivos de los trabajos.

Para cada solución considerada se definirán los modos de fallo principales y se propondrán distintas relaciones de fallo entre los niveles jerárquicos de dique, que se plasmarán por medio de un diagrama de componentes (ver Artículo 2.3.4). Asimismo se considerarán los resultados de distintas estrategias de reparación y las consecuencias del calentamiento global.

VERIFICACIÓN DE LA FIABILIDAD

Se verificará el comportamiento del dique y sus componentes en las secuencias de estados de un número reducido de ciclos de sollicitación característicos de las condiciones extremas a las que estará sometida la obra. Los ciclos se seleccionarán de tal forma que la probabilidad de fallo en vida útil del modo considerado sea inferior a la obtenida del reparto de probabilidades. Los ciclos se caracterizarán, al menos, mediante la duración de la rama de crecimiento, la duración de la rama de decrecimiento y valores compatibles y simultáneos de los agentes no predominantes en cada una de las ramas. En todo caso, los valores de los agentes para la verificación serán aquellos transformados por la interacción de los incidentes con el dique.

La verificación se efectuará en cada uno de los estados de los ciclos de sollicitación característicos. La sustitución de los descriptores en la ecuación de verificación de los modos sin modelo de evolución del daño proporciona el valor del margen de seguridad. En el caso de modos verificados a niveles avanzados de avería, una vez iniciada, el valor medio acumulado progresará de acuerdo con un modelo de acumulación del daño en función de los descriptores de estado del ciclo (ver Artículo 2.4.1).

Si se produce el fallo del modo, se puede admitir que la probabilidad de presentación del ciclo de mayor o igual intensidad es una medida de la probabilidad de ocurrencia del modo. Aplicando el mismo método para los otros modos dominantes se podrá verificar si el diseño del tramo cumple, o no, con el reparto de probabilidades establecido y las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia empleadas para su definición.

La estimación de los costes de reparación se podrá efectuar analizando la evolución de la avería de los distintos modos en otros ciclos más frecuentes pero de intensidad tal que no lleguen a desencadenar el fallo.

Además, para proyectos de Clase II y la solución seleccionada, se verificará por medio de métodos de Nivel III, empleando técnicas de simulación (ver Artículo 4.3.3) que permitan evaluar la evolución espacio-temporal del daño y los efectos de las estrategias de reparación. Las simulaciones se podrán efectuar por ciclos de sollicitación en la fase de proyecto y cumplirán, al menos, con los siguientes requisitos:

- ◆ El comportamiento de cada descriptor principal en un ciclo se ajustará a unas características impuestas por su función de probabilidad marginal no estacionaria en el rango de su cola superior.
- ◆ La serie generada reflejará la dependencia temporal de cada descriptor consigo mismo y con el resto de descriptores.

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- ◆ La serie generada reproducirá la estadística de la duración de ciclos, los intervalos entre ellos y su carácter no estacionario.
- ◆ La serie generada considerará los efectos del calentamiento global por medio de tendencias o escenarios.

La verificación se efectuará en cada uno de los estados de los ciclos de sollicitación en la vida útil de cada una de las simulaciones, con los valores de los agentes transformados por la interacción de los incidentes con el dique. Constará de dos partes que pueden estar, o no, englobadas dentro de un mismo modelo. Estas son (1) la comprobación del inicio de la avería y su valor y (2) la acumulación del daño.

La comprobación del inicio de avería se efectuará a nivel de estado atendiendo a dos criterios: (a) resolviendo una ecuación de estado (ecuación de verificación) que depende de los descriptores del estado meteorológico u otras variables aleatorias del estado y (b) aplicando los árboles de desencadenamiento y propagación del fallo en función del nivel de avería alcanzado en otro u otros modos.

La acumulación del daño se efectuará de acuerdo con lo indicado en el Artículo 2.4.1. Tanto si la avería alcanza su valor crítico como si se produce un fallo en un modo sin modelo de evolución, se admite que se produce la destrucción del componente y deben evaluarse las consecuencias de este fallo en el de otros componentes de nivel jerárquico superior (diagramas de componentes).

Se acotará el efecto de las estrategias de reparación en el comportamiento de la obra y sus costes asociados. Para ello se construirán los árboles de decisión y se analizará el efecto de, al menos, tres estrategias:

- (a) No reparación.
- (b) Reparación en cuanto se produce el inicio de la avería.
- (c) Intermedia.

Se verificará su viabilidad modelando los períodos entre ciclos de sollicitación definidos por valores de los agentes inferiores a unos valores umbrales que limitan los procesos constructivos. Otra manera de verificar la viabilidad es comparando estadísticos representativos del tiempo medio de los trabajos y del tiempo entre ciclos de sollicitación consecutivos susceptibles de hacer progresar la avería.

La fiabilidad de la obra o tramo se podrá evaluar a partir de la frecuencia de fallos en un número suficiente de simulaciones.

VERIFICACIÓN DE LA OPERATIVIDAD

El procedimiento para la verificación de la operatividad se podrá efectuar de forma análoga al indicado en los Estudios Previos, distinguiéndose únicamente en el nivel de detalle y la calidad y precisión de los datos a partir de los cuales se efectúa la verificación.

Además, para proyectos de Clase II y la solución seleccionada, la verificación de la operatividad se podrá efectuar analizando la región de parada operativa en las funciones de distribución conjunta de los descriptores de estado en el intervalo de tiempo analizado mediante métodos de Nivel II o mediante métodos de Nivel III que, en su caso, pueden apoyarse en simulaciones. El número medio de paradas operativas se podrá obtener ajustando un modelo para el número de pasos ascendentes sobre un umbral operativo.

VERIFICACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Se podrán considerar costes y plazos medios de construcción en función de la tipología y sus dimensiones, del rendimiento de las operaciones y de las estrategias de avance, y atendiendo, entre otros, a la frecuencia de superación por parte de los agentes climáticos de los umbrales de operatividad de los medios de trabajo y a la incertidumbre de la respuesta del terreno.

Además, para proyectos de Clase II y la solución seleccionada, se podrán estimar las distribuciones estadísticas de los plazos y costes de construcción en función de la tipología y sus dimensiones, del rendimiento de los trabajos y de las estrategias de avance. Para ello se podrá hacer uso de simulaciones que tengan en cuenta la frecuencia y duración de los intervalos de operatividad de los medios constructivos junto con las estrategias de avance planteadas y sus costes asociados.

Anteproyecto y Proyecto de Construcción

HIPÓTESIS DE TRABAJO

En el Anteproyecto y el Proyecto de Construcción se efectuará un análisis completo del comportamiento espacio-temporal de la obra, en el que considerarán, al menos, las siguientes hipótesis de trabajo:

- (a) Se definirán las relaciones entre el fallo de los distintos niveles jerárquicos de la obra por medio de diagramas de componentes, así como las hipótesis de mutua exclusividad y dependencia.
- (b) Se verificarán todos los modos principales de cada uno de los tramos de la obra mediante técnicas de tipo probabilista. Los modos no principales se verificarán, al menos, mediante técnicas deterministas, normas de buena práctica u otras similares.
- (c) La verificación se efectuará de forma simultánea en la totalidad del conjunto de modos principales, agrupados por su distribución espacial y localización de acuerdo con la jerarquía de tramos y subsistemas.
- (d) Los valores de los agentes que toman parte en las ecuaciones de verificación serán el resultado de la interacción de los incidentes con los distintos tramos y subsistemas de la obra.
- (e) Con carácter general, la avería de los distintos modos podrá progresar en el tiempo desde un valor de inicio hasta otro de fallo o destrucción, y esta evolución se caracterizará mediante el correspondiente modelo de acumulación del daño.
- (f) Se considerará la evolución espacial de la avería mediante diagramas de desencadenamiento y propagación.
- (g) Las estrategias de reparación se apoyarán en el desarrollo de árboles de decisión y permitirán una caracterización precisa de los criterios de inicio y cese de los trabajos, así como de los requisitos para su puesta en práctica.
- (h) Se considerarán de forma específica los efectos del calentamiento global por medio de covariables que afecten a los parámetros de los modelos de probabilidad de los factores de proyecto.
- (i) La descripción del proceso constructivo permitirá caracterizar de forma precisa los criterios y requisitos para el avance de los distintos frentes de obra.

La clasificación de los modos de fallo y las relaciones de fallo entre los niveles jerárquicos de dique serán los de la solución seleccionada.

VERIFICACIÓN DE LA FIABILIDAD

La verificación del comportamiento de la obra se efectuará mediante simulación completa de las secuencias de estados a lo largo de la vida útil, que permitan estudiar el comportamiento de la infraestructura, así como las labores de conservación y reparación tanto en ciclos de sollicitación como en los períodos de calma y operatividad. Estas simulaciones deben cumplir con los siguientes requisitos:

- ◆ El comportamiento de cada descriptor se ajusta a unas características impuestas por su función de probabilidad marginal no estacionaria (considerando el efecto del calentamiento global) en el rango de su cuerpo central y colas inferior y superior.
- ◆ La serie generada reflejará la dependencia temporal de cada descriptor consigo mismo y con el resto de descriptores.
- ◆ La serie generada reproducirá la estadística de la duración de ciclos, los intervalos entre ellos y su carácter no estacionario, así como de los períodos de calma y operatividad.

La verificación simultánea de todos los modos en cada estado de cada simulación se efectúa de forma análoga a lo indicado para el Estudio de Alternativas y de Soluciones. Para ello se considerarán los diagramas de componentes, los árboles de desencadenamiento y propagación del fallo y los árboles de decisión.

La estrategia de reparación de las averías del dique contendrá toda la información necesaria para evaluar, en cada estado de la simulación, los siguientes aspectos:

- (a) Medios y tiempo necesario para iniciar la reparación del modo.
- (b) Planificación y cronograma de la reparación.
- (c) Umbrales de los agentes y requisitos de operatividad para acotar las esperas y las paradas programadas en la reparación.
- (d) Estrategias y decisiones si no se consigue reparar en el plazo estipulado.

Esta información facultará la evaluación del estado de la obra (niveles de avería/fallo de los distintos componentes) a lo largo del tiempo y su influencia en la operatividad del área portuaria. La fiabilidad de la obra o tramo y su evolución temporal se podrán calcular a partir de la frecuencia de fallos en un número suficiente de simulaciones y el seguimiento del estado de la obra a lo largo de su vida útil.

VERIFICACIÓN DE LA OPERATIVIDAD

La verificación de la operatividad se efectuará de forma simultánea con la de la fiabilidad. Si la parada no se debe a la ocurrencia de un único evento sino a la combinación de varios ocurriendo simultáneamente, la verificación se efectuará atendiendo a los diagramas de operatividad.

VERIFICACIÓN DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

Las distribuciones estadísticas de los plazos y costes de construcción se obtendrán de la simulación de los agentes climáticos durante la fase de proyecto y de la comprobación de las estrategias de avance planteadas y de sus costes, considerando los fallos, retrasos y posibles retrocesos en las mismas.

4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD SEGÚN LOS FACTORES DE PROYECTO

Resulta conveniente efectuar un análisis de sensibilidad para evaluar el efecto que los distintos factores que intervienen en la verificación tienen en el resultado de la misma, en particular para determinar, (1) si se cuenta con información de partida suficiente para la verificación de la fiabilidad y de la operatividad, y (2) el coste marginal para incrementar la fiabilidad. Como resultado se obtendrán aquellos factores “críticos” cuyo impacto sobre las variables de interés se espera mayor.

En función del grado de desarrollo del proyecto se pueden aplicar métodos con distinto nivel de complejidad, entre otros, métodos discretos, análisis de elasticidad en el entorno del valor de referencia, algoritmos de clasificación (ver Artículo 2.7) o métodos de Nivel II (ver apartado 4.13.1.5 de la ROM 1.0-09).

Se podrá considerar, entre otras, la influencia de los factores sobre los siguientes conjuntos de variables de tipo técnico:

- ◆ Fiabilidad y operatividad de la obra y sus componentes
 - Probabilidad de fallo en tramos, subsistemas y elementos
 - Probabilidad de parada en tramos, subsistemas y elementos
- ◆ Fallo de la obra por modos
 - N° de Inicios de Avería inducidos por los agentes naturales
 - N° de Inicios de Avería inducidos por otros modos

- Tasa de progresión de la avería una vez iniciada
- N° de fallos (la avería progresa hasta destrucción)
- Margen de seguridad mínimo

- ◆ Vulnerabilidad espacial y líneas de fallo
 - N° de fallos de cada elemento
 - N° de fallos de cada subsistema
 - N° de fallos de cada tramo

- ◆ Estrategias de reparación
 - N° de averías que progresan hasta un nivel indeseado
 - N° de veces que no es posible iniciar la reparación por falta de medios
 - N° de veces que no es posible iniciar la reparación por cuestiones operativas
 - Tiempo medio desde que se declara la necesidad de reparación hasta que se inicia

Índice Sección V

SECCIÓN V: EVALUACIÓN DE COSTES, OPTIMIZACIÓN Y NIVEL DE RIESGO

5.1	CONTEXTO Y ÁMBITO DE LA EVALUACIÓN DE COSTES EN ESPAÑA.....	159
5.2	OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN DE COSTES Y SISTEMA DUAL DE OPTIMIZACIÓN	160
5.2.1	Costes de capitalización de un dique de abrigo	161
5.3	COSTES EN EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO	161
5.3.1	Organización del cálculo de los costes totales	162
5.3.2	Cálculo de costes en el Proyecto de Construcción	163
5.3.3	Cálculo del descriptor de los costes totales	166
5.4	OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN	170
5.4.1	Elementos que definen un método de optimización técnico-económica	171
5.4.2	Método simplificado de optimización	173
5.4.3	Análisis de sensibilidad del diseño del dique.....	174
5.4.4	Secuencia para la optimización y análisis de sensibilidad técnico-económica del coste del dique en el ciclo vital	174
5.4.5	Modelo de Optimización recomendado del coste acumulado.....	175
5.5	ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD Y NIVEL DE RIESGO DEL PROYECTO DE INVERSIÓN.....	176
5.5.1	La conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR	176
5.5.2	Adecuación y optimización del Proyecto de Inversión	177
5.5.3	Sistema dual de Optimización y nivel aceptable de riesgo	178
5.5.4	Indicadores de la conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR	178
5.6	CONDICIONES DE TRABAJO EXCEPCIONALES Y EL ANÁLISIS DE ACCIDENTALIDAD	184
5.6.1	Análisis de la accidentalidad.....	185

5. Evaluación de costes, optimización y nivel de riesgo

El objetivo principal de un dique de abrigo es que las operaciones portuarias y logísticas relacionadas con el transporte marítimo, su interconexión con otros modos de transporte y la gestión integral del barco, se desarrollen con la seguridad, operatividad y competencia requeridas. Además, estas actividades deben tener la calidad necesaria para ser competitivas y eficientes, optimizando los costes totales, acotando el nivel de riesgo de la inversión y cumpliendo la normativa vigente, en particular la ambiental.

En esta sección se presentan los métodos y las herramientas para optimizar el proyecto del dique desde la perspectiva técnico-económica del Programa ROM y supeditado a los resultados obtenidos de la optimización económico-financiera de acuerdo con MEIPOR. Esta doble condición se enmarca en un sistema dual de optimización con restricciones simultáneas y compatibles. Finalmente, se relaciona este sistema con el análisis de la accidentalidad del área portuaria incardinado en las condiciones de trabajo excepcionales CT₃.

5.1 CONTEXTO Y ÁMBITO DE LA EVALUACIÓN DE COSTES EN ESPAÑA

Para ejecutar estas actividades, en España se dispone de dos herramientas, una técnica, el Programa de “Recomendaciones para Obras Marítimas (ROM)” y, en este caso, la ROM I.1-18, y otra económico-financiera, MEIPOR-16. Ambas herramientas comparten objetivos, planteamientos y procedimientos por lo que su aplicación debe estar coordinada.

Entre los objetivos de la versión MEIPOR-16 está asegurar su coherencia con las Guías de Análisis Coste-Beneficio de la Unión Europea (CE, 2002), cuya última versión fue publicada por la Comisión en el año 2015. Para ello, incorpora y refuerza un análisis de alternativas para verificar la idoneidad de la solución propuesta, apoyándose en el análisis de rentabilidad financiera del capital y la sostenibilidad financiera del proyecto, el análisis económico y los análisis de sensibilidad y de riesgos del Proyecto de Inversión. Además, en sintonía con las Recomendaciones de Obras Marítimas, en particular con la ROM 0.0-01, MEIPOR-16 incorpora recomendaciones, métodos de cálculo y criterios para su evaluación estadística en la vida útil.

Entre los objetivos del Programa ROM está la optimización técnico-económica de las infraestructuras del área portuaria satisfaciendo los requisitos de proyecto frente a la seguridad y la operatividad. Para ello, la ROM 0.0-01, en su apartado 7.8, recomienda comparar dos formas de abordar la concepción y dimensionamiento del dique de abrigo,

- (a) en función de los requisitos de proyecto frente a la seguridad y operatividad en cada una de las fases de proyecto,
- (b) mediante la optimización económica (mínimo coste total) del proyecto en el ciclo vital de la obra sujeto a ciertas restricciones.

Ambas formas de dimensionamiento no son excluyentes y pueden compatibilizarse en la optimización técnico-económica del dique a través de las restricciones al problema. En todo caso, los resultados obtenidos deben estar de acuerdo con las previsiones del análisis de la rentabilidad financiera y económica del Proyecto de Inversión (apartado 7.8.3.1 de la citada ROM 0.0-01).

En esta Sección de la ROM 1.1-18 se presenta el marco conceptual para la evaluación de los costes totales del dique (infraestructura marítima) en cada uno de los diferentes grados de desarrollo del proyecto, incluido el Proyecto de Construcción y su optimización técnico-económica. Esta evaluación se apoya en el diseño del dique de abrigo (en un área portuaria y un entorno) y su verificación frente a la seguridad y la operatividad, en sintonía con las conclusiones y recomendaciones de la planificación portuaria en un marco legal/ambiental vigente. Finaliza con el cálculo de indicadores socio-económicos de la infraestructura y su transferencia a MEIPOR para elaborar el Proyecto de Inversión con un nivel aceptable de riesgo de la inversión.

En los Artículos siguientes se presentan diferentes opciones de integración de ambas estrategias de concepción y dimensionamiento del dique y sus tramos a través del planteamiento y resolución del problema de la optimización técnico-económica del Proyecto de Construcción integrado en un sistema dual de optimización.

5.2 OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN DE COSTES Y SISTEMA DUAL DE OPTIMIZACIÓN

El Proyecto de Construcción del dique de abrigo debe incorporar la optimización de sus costes de construcción, conservación y, en su caso, los eventuales de reparación y de desmantelamiento en la vida útil de la infraestructura; además, para Proyectos de Clase II, debe adecuarse a las previsiones del análisis de la rentabilidad financiera y económica del Proyecto de Inversión.

La optimización de costes no se circunscribe al ámbito de los proyectos de nueva construcción, sino que, tal y como se recoge en la ROM 0.0-01, también a otros proyectos de obras marítimas y portuarias, tales como los de conservación, reparación, reconstrucción o desmantelamiento.

Para coordinar la toma de decisiones en los ámbitos técnico-económico de ROM y económico-financiero de MEIPOR es conveniente plantear y optimizar de forma conjunta los objetivos de los Proyectos de Inversión y Construcción. Una posible secuencia de las actividades de esta optimización dual es,

1. iniciar el proceso con la optimización técnico-económica de la infraestructura (dique de abrigo), incorporando los requisitos y condicionantes definidos en el marco de los estudios de planificación; seguidamente
2. continuar con la optimización económico-financiera y el análisis de riesgos incorporando los resultados de la optimización técnico-económica anterior (que forma parte de los estudios económico-financieros y análisis coste-beneficio propios del Proyecto de Inversión o alguno de sus grados de desarrollo); y seguidamente,
3. iniciar un nuevo ciclo de optimización con los nuevos requisitos y condicionantes del proyecto ajustados a los resultados de la aplicación de MEIPOR.
4. iterar esta secuencia hasta alcanzar un diseño que satisfaga los objetivos de los Proyectos de Inversión y de Construcción cumpliendo sus requisitos y condicionantes legales, sociales y ambientales.

En esta ROM se aborda, esencialmente, la optimización técnico-económica de un dique de abrigo y los correspondientes análisis de sensibilidad. La optimización económico-financiera del área portuaria y su dependencia del dique de abrigo se debe realizar en el ámbito de MEIPOR-16. Por su generalidad, estos métodos y técnicas se pueden aplicar, prácticamente sin variación, a otras infraestructuras marítimas y portuarias.

5.2.1 Costes de capitalización de un dique de abrigo

El coste de capitalización del dique de abrigo a lo largo de su ciclo vital comprende los costes debidos a (a) la inversión inicial, (b) las labores de conservación, (c) las labores de reparación y reconstrucción y (d) la pérdida de operatividad en el área portuaria por fallos de la infraestructura. A priori, los cuatro costes específicos son variables aleatorias con una función de distribución conjunta que deben determinarse en el ámbito del Proyecto de Inversión. En MEIPOR-16 estos costes afectan de forma directa, al menos, a los siguientes flujos de caja:

- (a) Costes de inversión: incluyen los costes de establecimiento o puesta en marcha, los costes fijos de inversión y las variaciones en el capital circulante. Se desagregan por concepto para el análisis económico. Deben incluir los costes fijos necesarios para,
 - la realización y puesta en servicio del proyecto,
 - las reposiciones, adaptaciones y ampliaciones que sean necesarias en la vida útil, y
 - las reposiciones y correcciones ambientales requeridas.
- (b) Costes de operación: incluyen los desembolsos regulares realizados por cada agente identificado y previstos para el correcto funcionamiento u operación de la infraestructura resultante del Proyecto de Inversión. Contablemente, son aquellos costes o gastos cuyos efectos son visibles en el mismo ejercicio económico en el que se contabilizan. Incluyen los costes de conservación y explotación necesarios para que el tramo proporcione las condiciones adecuadas de uso y explotación del área portuaria y, en su caso, de sus instalaciones.
- (c) Ingresos de operación: incluyen las entradas de caja derivadas de la explotación del Proyecto de Inversión para cada agente identificado y permiten compensar las salidas relacionadas con los costes de inversión y operación. Dependen, entre otros, de las limitaciones y cese de las actividades y servicios del área portuaria.

Además, se deben considerar las externalidades imputables al proyecto que deben incluir los aspectos sociales y ambientales que afectan a la colectividad. No es habitual que un método de análisis económico-financiero valore los beneficios de los aspectos ambientales, sino que se circunscribe a los costes de inversión y de conservación y explotación necesarios para garantizar el cumplimiento de los requisitos ambientales.

COMENTARIO

Posiblemente, en los próximos años se amplíe y desarrolle la legislación específica a este respecto que servirá de guía para incorporar las externalidades ambientales. Entretanto, ya que el carácter del tramo se basa en un cálculo cualitativo del ISA de la ocurrencia del modo pésimo (frente a la seguridad o la operatividad), los aspectos considerados (y ampliados a otros modos principales) pueden ayudar a su estimación.

5.3 COSTES EN EL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DE UN DIQUE DE ABRIGO

El Proyecto de Construcción debe apoyarse en un análisis de la inversión económica, productiva y de servicio público, que incluya los aspectos medioambientales y de seguridad y que, permita (1) valorar la viabilidad del proyecto para los agentes que lo promueven y (2) efectuar una optimización técnico-económica de la obra en su conjunto y en cada una de sus partes.

A tal efecto, en esta ROM 1.1-18, los costes imputables al dique se organizan en,

- ◆ costes de construcción,
- ◆ costes de reparación,
- ◆ costes de desmantelamiento,
- ◆ costes de conservación y
- ◆ costes por pérdida de operatividad de las actividades y servicios asociados al dique.

La evaluación de estas cantidades para distintas tipologías, diseños y estrategias de construcción y reparación constituyen la base para la optimización técnico-económica de la obra y sus tramos.

5.3.1 Organización del cálculo de los costes totales

La unificación del análisis económico y técnico necesario para la optimización del dique requiere la desagregación de los costes atendiendo a las escalas temporales y a la jerarquía espacial descritas en el Artículo 2.2. También resulta conveniente establecer vínculos y paralelismos con las herramientas empleadas en la configuración de los aspectos técnicos de la obra.

Escalas temporales y jerarquía espacial

De acuerdo con la organización temporal (Sección 2, Artículo 2.2.1) los costes de inversión se calculan por fases de proyecto. De este modo, los costes de construcción, reparación y desmantelamiento se adscriben a sus respectivas fases, mientras que, los costes de conservación y por pérdida de operatividad se asignan a la fase de explotación. Si fuera necesario, se puede concretar la adscripción de los costes definiendo subfases específicas para ello. Los costes se pueden acumular en distintos intervalos de tiempo, bien atendiendo a su variabilidad, bien al análisis económico y financiero del proyecto. Es habitual que la optimización técnico-económica se apoye en un cálculo anual y su cómputo total en la vida útil (o ciclo vital completo) de la obra.

De acuerdo con la organización espacial (Sección 2, Artículo 2.2.2) los costes totales del dique se evalúan por tramos considerando la contribución de cada una de sus partes, subsistemas, elementos y subelementos.

Diagramas de costes

Apoyándose en el mismo procedimiento (Sección 2, Artículo 2.3.4), los diagramas de costes se estructuran sobre los diagramas de componentes y constituyen un apoyo para el reparto de probabilidades al organizar los costes asociados al fallo y los requeridos para evitarlo de acuerdo con distintos diseños y estrategias. Acompañando a cada diagrama de componentes se debe incluir una valoración del coste total de las consecuencias del fallo del conjunto analizado. A su vez, a cada componente del diagrama se le asignarán (1) los costes de reconstrucción y (2) los correspondientes a la pérdida de operatividad de las actividades y servicios afectados durante dichos trabajos.

Paralelamente, conviene efectuar una estimación de los costes imputables a cada componente para evitar el fallo del conjunto. En los elementos en serie se vinculan a la construcción y a la acumulación, en su caso, de los costes medios de reparación a lo largo de la fase (incluyendo los de pérdida de operatividad). En los elementos en paralelo se vinculan a la construcción, bien a los costes acumulados de acuerdo con la estrategia de reparación, bien a los costes de reconstrucción (incluyendo en ambos casos los de pérdida de operatividad).

Árboles de propagación de costes

Apoyándose en el mismo procedimiento (Sección 2, Artículo 2.6.1), los árboles de propagación de costes complementan los árboles de decisión al incluir una valoración económica de los costes de reparación en función de las estrategias definidas. A tal efecto, se consideran tanto el modo en que se inicia la avería, como aquellos en los que se desencadena, y se incorporan, para cada estrategia, una estimación del número de reparaciones en el intervalo de tiempo considerado acompañada de la evaluación de (1) los costes de reparación, (2) los correspondientes a la pérdida de operatividad de las actividades y servicios afectados durante dichos trabajos y (3) los costes correspondientes a las consecuencias del fallo de la estrategia ponderados por su probabilidad.

Modelo de probabilidad de la variable de coste (acumulada)

El coste total a lo largo del ciclo vital del dique puede ser tratado, de forma análoga al nivel de daño de un elemento (Sección 2, Artículo 2.4.4), como una variable aleatoria acumulativa. La evolución de los costes acumulados en un intervalo de tiempo se pueden modelar en función de algunos (pocos) agentes predominantes según la ecuación 2.6. Asimismo, para el análisis y la caracterización de la evolución temporal de su función de probabilidad o alguno de sus descriptores estadísticos, se puede aplicar lo indicado en el Artículo 2.4 para este tipo de modelos (ver Artículo 5.3.3).

5.3.2 Cálculo de costes en el Proyecto de Construcción

A continuación se indican algunos procedimientos recomendados para la evaluación de costes en las fases de construcción y desmantelamiento, explotación y reparación.

Para el cálculo de los costes totales se recomienda agrupar los costes en, (1) directos, (2) indirectos y (3) por daños y pérdidas materiales. Se engloban dentro de los costes directos de la obra los costes de ejecución, costes materiales y costes fijos. Los costes indirectos incluyen todos aquellos gastos que no son directamente imputables a unidades de obra concretas, sino al conjunto o parte de la obra. Los costes totales son la suma de los anteriores y de los asociados a los daños, pérdidas y retrasos sufridos por las distintas subfases.

Fases de construcción y desmantelamiento

Los costes en las fases de construcción y desmantelamiento dependerán de la estrategia de desarrollo de los trabajos y las características del clima marítimo en el emplazamiento. Para su cálculo se consideran, al menos, (a) los costes de ejecución de los trabajos, (b) los costes por daños y pérdidas, (c) los costes adicionales por retrasos y (d) los costes por afección a otras infraestructuras o servicios.

Con carácter general, la evaluación de costes del proceso constructivo de un dique de abrigo se realiza: para cada subfase constructiva en todos los tramos y transiciones del dique, de acuerdo con la estrategia definida y atendiendo a las características del clima marítimo en el emplazamiento.

Con respecto a la planificación, se consideran los requisitos de ejecución de cada subfase, incluyendo las restricciones al avance y la dependencia con el progreso de otras subfases, así como los periodos de parada estacional.

Con respecto a los trabajos, se tendrán en cuenta sus rendimientos y los niveles de operatividad de los medios dispuestos.

Por analizar la secuencialidad de los trabajos y su grado de interdependencia, el procedimiento más adecuado es la caracterización completa mediante técnicas de simulación de Monte Carlo. Para los grados de desarrollo iniciales del Proyecto de Construcción se puede, bien emplear otras técnicas más simples, bien ejecutar Monte Carlo con hipótesis que reducen la información necesaria y tiempo de ejecución requerido.

Figura 5.1: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de construcción y de desmantelamiento

Fase de reparación

El cómputo de los costes de reparación conlleva el cálculo de,

- la frecuencia de reparaciones en la escala temporal considerada, y
- un descriptor de los costes específicos de cada una de estas acciones de reparación.

El primero de ellos depende de los criterios de inicio de reparación, de los modelos de evolución espacio-temporal de la avería y de la descripción estadística en magnitud y frecuencia del clima marítimo en el emplazamiento, especialmente de los eventos de tormenta asociados a las colas superiores de los agentes. Se evalúa, entre otros métodos, mediante la integración del daño acumulado en un ciclo sintético de solicitud y el cómputo de su frecuencia de presentación, expresando la dependencia con una variable característica de la magnitud del ciclo.

El segundo depende de la estrategia de desarrollo de los trabajos, que se apoya, fundamentalmente, en los mismos elementos que los descritos para el cálculo de los costes en las fases de construcción y desmantelamiento. Adicionalmente, se debe considerar la propagación de la avería y sus efectos durante los intervalos de tiempo de la fase de reparación en que ésta no puede desarrollarse por motivos logísticos, de organización de los trabajos o de parada operativa.

Figura 5.2: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de reparación



Fase de explotación

Los costes en la fase de explotación imputables al dique se deben esencialmente a,

- las labores de control del estado de la obra y conservación, y
- la limitación o cese de las actividades del entorno del dique y del área portuaria.

Mientras que los primeros pueden computarse como partidas fijas con la frecuencia requerida en el proyecto y un valor acorde a las tareas previstas en el mismo, los segundos deben de evaluarse atendiendo a su naturaleza aleatoria.

Para las pérdidas debidas a la reducción o cese de las actividades y servicios portuarios achacables al dique se deben incluir, entre otras, las debidas, bien a modos de parada operativa, bien a fallos o averías en alguno de sus componentes antes de que se inicie una fase de reparación. Tanto en un caso como en otro, los costes se evalúan calculando, por un lado, la frecuencia y duración de los eventos de cese de operatividad y, por el otro, las pérdidas estimadas debidas a dicha afección.

La frecuencia y duración de los modos de parada operativa se pueden evaluar a partir de su ecuación de verificación y de la descripción estadística de la magnitud de los agentes climáticos y de su frecuencia de presentación. En cualquier caso, las características de dichos agentes se especificarán en el emplazamiento y tendrán en cuenta su interacción con la estructura.

La frecuencia de la limitación o cese de las actividades debida a fallos o averías se evaluarán considerando,

- ◆ la ecuación de verificación de cada modo de fallo,
- ◆ los agentes climáticos y del comportamiento del terreno, y
- ◆ la respuesta de la estructura y de cada uno de sus elementos teniendo en cuenta la interacción de los agentes y la tipología.

La duración de estos períodos depende del modelo acumulativo de la avería y de las estrategias de reparación.

El cálculo de los costes asociados a la limitación o cese de las actividades puede caracterizarse por un valor esperado por unidad de tiempo, con una incertidumbre debida a, (1) la forma de gestionar y explotar la infraestructura y (2) el comportamiento y la evolución de: (a) el transporte y en particular el tráfico marítimo, y (b) los

sistemas financieros y económicos. Estos aspectos afectan directamente al Proyecto de Inversión y la toma de decisiones y son objeto de MEIPOR-16.

COMENTARIO

Las técnicas estadísticas y de simulación presentadas en esta ROM se pueden aplicar al análisis de la incertidumbre de la evolución macroeconómica de la economía y otras magnitudes que intervienen en el análisis económico y financiero requerido en MEIPOR-16, tal y como se recoge en el Ejemplo **Cálculo de la fdp de la rentabilidad del proyecto de inversión en función del nivel de avería del dique de abrigo**.

Figura 5.3: Secuencia de cálculo del descriptor del coste total de explotación



5.3.3 Cálculo del descriptor de los costes totales

Con carácter general, el descriptor de costes totales acumulados, C_T del dique de abrigo, habitualmente el valor esperado, se puede expresar de acuerdo con los términos señalados en la ecuación 5.1

$$C_T(t) = \sum_{\tau=1}^T \left\{ C_{CON}(\bar{x}, c_{CON}, \psi_{CON}; t) + \sum_{s=1}^S \left[C_{MAN}(c_{MAN}; t) + \sum_{m=1}^M C_{REP}(\bar{x}, c_{REP}, \psi_{REP}; t) \right] + C_{DES}(\bar{x}, c_{DES}, \psi_{DES}; t) \right\} + C_{CA}(\bar{x}, c_{CA}, \psi_{GES}; t) + C_{EXT} \quad (5.1)$$

donde C representa a un descriptor de costes, es un vector con los factores de proyecto, c son los costes unitarios y ψ las estrategias. Los índices τ , s y m corresponden a los niveles jerárquicos “tramo”, “subsistema” y “modo” y los subíndices “CON”, “MAN”, “REP”, “DES”, “CA”, “GES” y “EXT” corresponden, respectivamente, a la construcción, conservación, reparación, desmantelamiento, cese de las actividades, gestión y externalidades. Finalmente t representa el tiempo transcurrido desde un instante de referencia.

Compatibilidad temporal de la acumulación de los costes totales

Los costes totales transcurrido un tiempo t desde un inicio de referencia (inicio de construcción, entrada en servicio, etc.) se obtienen por la suma de los costes parciales que dependen del tiempo transcurrido, de la presentación aleatoria de agentes climáticos y del terreno que pueden ocasionar averías y, en su caso, de los posibles intervenciones de reparación/reconstrucción. Cada uno de los términos de la ecuación de costes totales cumple las condiciones necesarias para la aplicación del modelo de compatibilidad temporal (Castillo et al., 2012).

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

De forma análoga a otras variables acumulativas, la acumulación temporal de los costes que se acumulan en el tiempo debe cumplir que, si C_{T_i} es el coste producido durante $t = t_1 + t_2$, c_1 el producido en el tiempo t_1 , y c_2 el producido en el tiempo t_2 , entonces $C_{T_i} = c_1 + c_2$. Matemáticamente se puede expresar como,

$$C_{T_i}(c_0, C_H, t) = q [q^{-1}(c_0, C_H) + t, C_H] \tag{5.2}$$

donde C_H es el coste de reparación debido a la ocurrencia del modo de fallo (o de parada), c_0 el coste inicial y $q(t, C_H)$ es la forma cómo se acumula el coste en función del modo de fallo y sus agentes predominantes H .

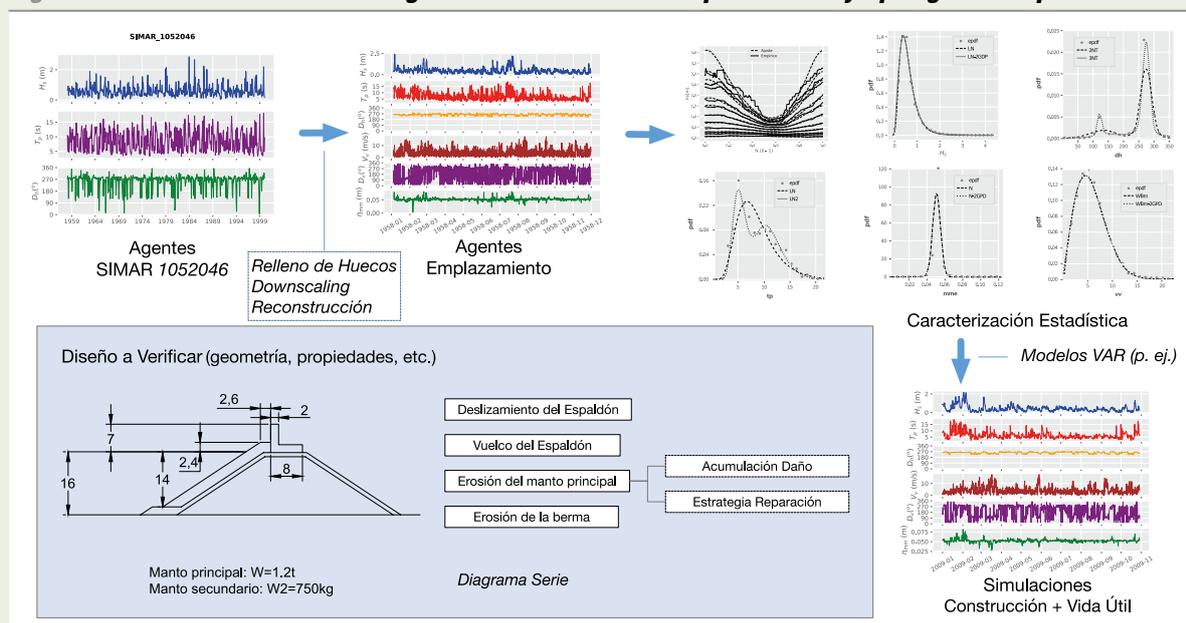
EJEMPLO

CÁLCULO DE COSTES TOTALES DE UN DIQUE EN TALUD

En las figuras siguientes se presentan algunos resultados relacionados con el esquema de cálculo de los costes totales de un dique en talud. Su longitud es de 500m en un único tramo y se considera que el subsistema exterior tiene tres modos de fallo principales. Se presentan solo los costes de reparación de la berma de pie. El ejemplo completo se muestra en el documento de *Manual para el diseño de diques de abrigo y de ayuda a la aplicación del Articulado de la ROM 1.1-18*.

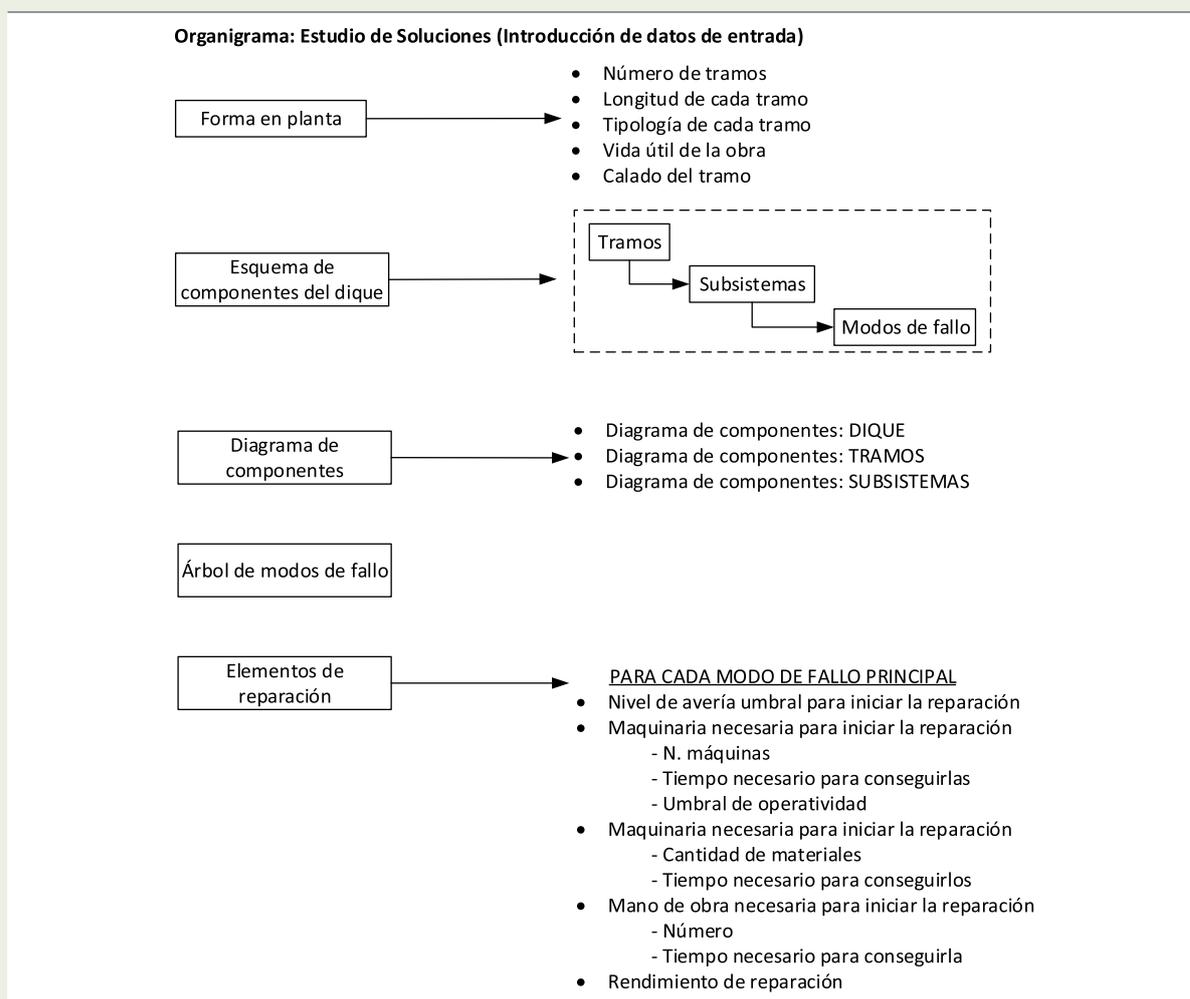
La figura 5.4 representa el esquema con los datos de partida necesarios para aplicar el procedimiento de cálculo: (1) caracterización de los agentes climáticos en el emplazamiento, (2) tipología y dimensionamiento previo de la sección y (3) simulación por Monte Carlo de las series temporales de la interacción por años. Se presentan los resultados de cinco años.

Figura 5.4: Caracterización de los agentes climáticos en el emplazamiento y tipología del dique en talud



En el organigrama de la figura 5.5 se representa la información utilizada para calcular los costes de reparación.

Figura 5.5: Esquema con los datos de entrada necesarios para calcular los costes de reparación mediante simulación numérica de Monte Carlo



Se analizan dos estrategias de reparación, denominadas por su naturaleza conservadora y arriesgada, respectivamente con los siguientes medios de construcción:

- ◆ Cinco camiones: con un coste de 25 €/h cada uno.
- ◆ Dos gánguiles: con un coste de 80 €/h cada uno y una altura de ola umbral de trabajo inferior a 1.5 m y 3 m de calado.
- ◆ 300 m³ de todo uno de cantera con un coste total de materiales asociado de 3000 €.
- ◆ Quince operarios con un coste de 10 €/h cada uno.

Para este ejemplo se considera que el tiempo que debe transcurrir desde que se da la orden de reparar hasta que los trabajos comienzan es como mínimo de 24 h puesto que en este ejemplo el puerto no dispone de medios y estos han de contratarse externamente.

Para la estrategia conservadora se considera un nivel de avería umbral para inicio de la reparación del 20%, mientras que para la estrategia arriesgada el umbral se fija en el 50%.

La figura 5.6 muestra el árbol de desencadenamiento de los tres modos de fallo, “MF_1”, “MF_2”, y “MF_4”. Las siglas de “T”, “SS” y “MF” se corresponden con Tramo, SubSistema y Modo de Fallo respectivamente. De acuerdo con el árbol considerado en este ejemplo, si el grado de avería del modo de fallo 1 alcanza el 20%, éste provoca el inicio de avería en el modo 2. Y si alcanza el 50% provoca el inicio de avería en el modo 4. Del mismo modo, el inicio de avería en el modo 2 puede provocar el inicio de avería en el modo 4 si el grado de avería alcanza el 30%.

Figura 5.6: Ejemplo de árbol de desencadenamiento y propagación del fallo

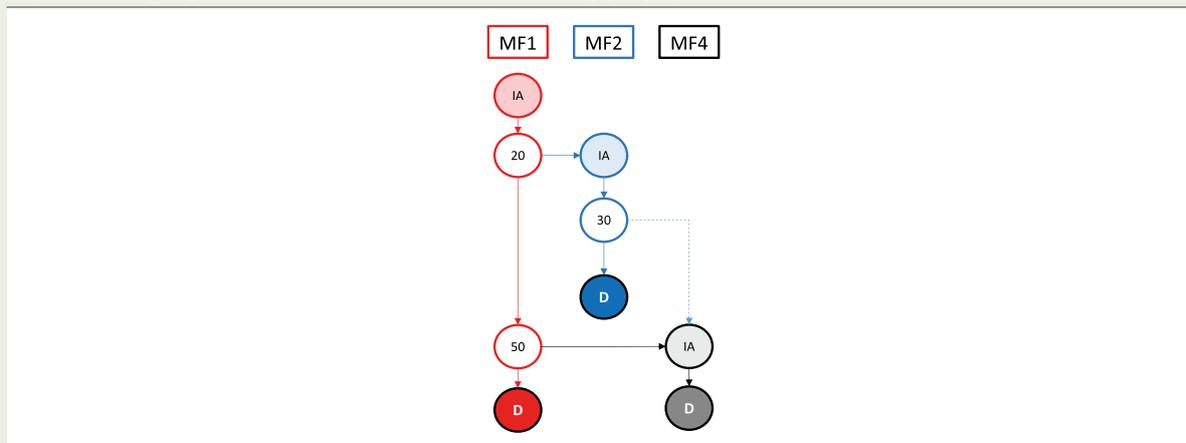
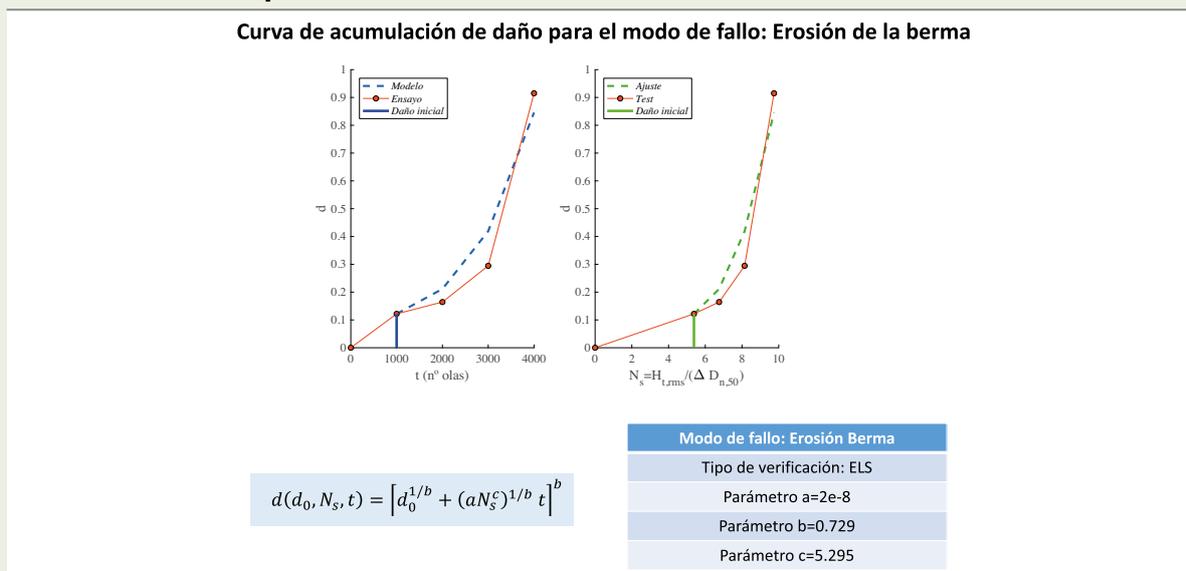


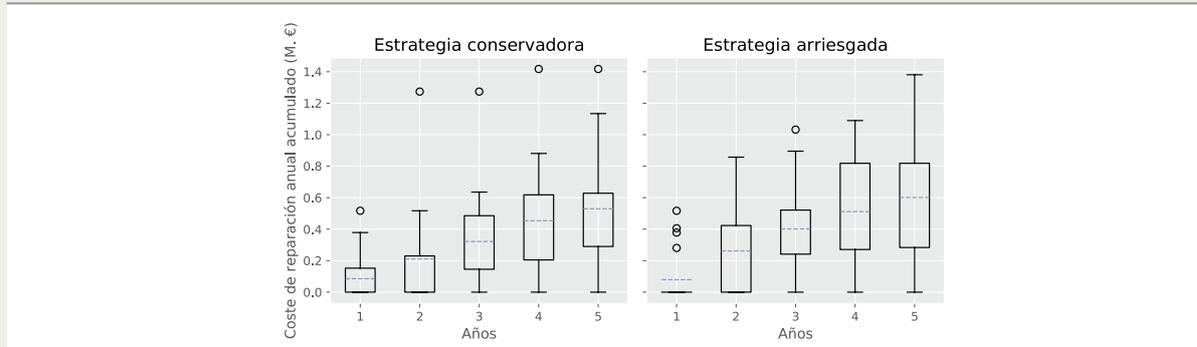
Figura 5.7: Parámetros de ajuste de la curva potencia de acumulación de daño para el modo de fallo erosión de la berma de pie



La acumulación del daño en el modo se calcula mediante una curva del tipo potencial de parámetros ($a = 2e-8$, $b=0.7129$ y $c=5.5295$) mostrada en la figura 5.7 y obtenida de los datos de berma de pie con piezas de escollera para un dique en talud de Van Gent y Van der Werf, 2014 y analizados por Vilchez et al., 2015. En concreto, los datos de la figura 5.7 son para la configuración ensayada de la berma de pie más ancha y gruesa en condiciones de alto nivel del agua y bajo peralte de la ola.

Los boxplots de la figura 5.8 muestran la distribución de costes de reparación acumulados en cinco años para las dos estrategias de reparación definidas. Las barras dentro de los boxplots indican los valores de los costes medios de todas las simulaciones realizadas. La muestra de costes ha sido obtenida mediante n repeticiones del proceso de adjudicación de costes a partir de la simulación de nuevas series climáticas mediante técnicas de Monte Carlo.

Figura 5.8: Boxplots con los costes de reparación acumulados en cinco años en euros para el modo de fallo erosión de la berma de pie

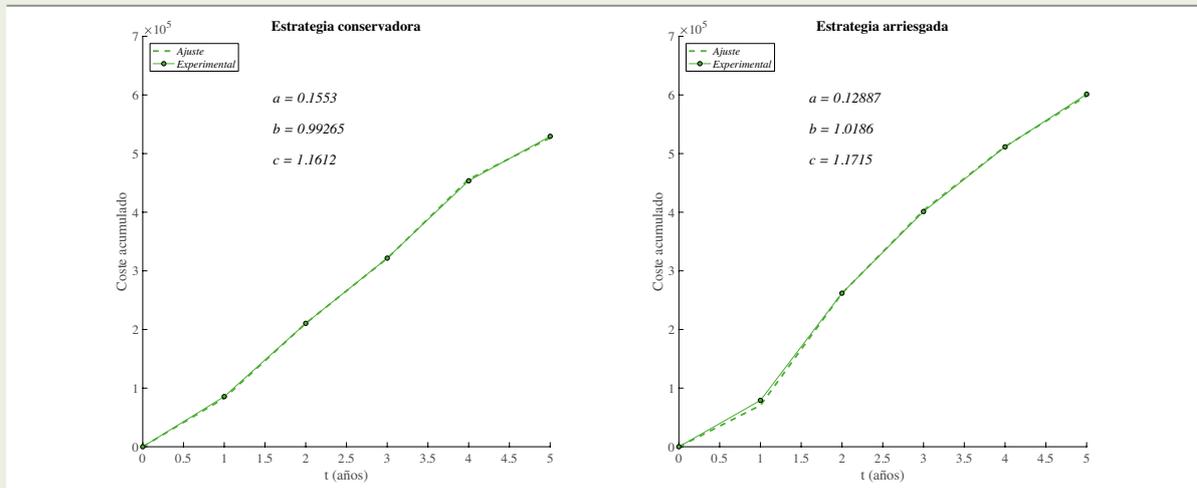


Los costes medios de reparación obtenidos se ajustan mediante un modelo de acumulación de costes de tipo potencial (ecuación 5.3). Los parámetros de ajuste se muestran en la figura 5.9.

$$C(c_0, H, t) = \left[c_0^{1/b} + (a C_H^c)^{1/b} t \right]^b \tag{5.3}$$

Este modelo consta de tres parámetros, a y c , que controlan el modo en que se producen los costes por reparación, C_H , ocasionados por la arribada de los agentes predominantes (oleaje) provocando costes de reparación y b que expresa la potencia que caracteriza el modo en que se acumula el coste.

Figura 5.9: Parámetros de ajuste de la curva potencial de acumulación de costes medios de reparación para el modo de fallo erosión de la berma de pie



Se observa que dado que b es casi uno el coste acumulado de reparación en la berma de pie crece linealmente con el tiempo.

5.4 OPTIMIZACIÓN Y ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DEL PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN

De acuerdo con la ecuación 5.1, el diseño del dique con sus dimensiones y propiedades, así como las distintas estrategias constructivas, de reparación, gestión y explotación pueden plantearse como un problema de optimización

técnico-económica en el que se minimiza la función objetivo de costes totales sujeta a restricciones de carácter técnico, económico y financiero.

El planteamiento general propuesto en estas Recomendaciones es el descrito en [Mínguez et al. \(2006\)](#) incluyendo, en su caso, la evolución de la avería. La citada metodología admite distintos niveles de complejidad en función del grado de desarrollo del proyecto. A su vez, la organización del dique por niveles jerárquicos, fases de proyecto y escalas temporales facilita la optimización parcial del mismo dentro de un procedimiento global de complejidad creciente.

5.4.1 Elementos que definen un método de optimización técnico-económica

Un método de optimización debe incluir, al menos, los siguientes elementos,

- (a) los dominios espacial y temporal en los que se define el problema,
- (b) los factores de proyecto,
- (c) la función objetivo uni- o multivariada,
- (d) las restricciones, y
- (e) las hipótesis del modelo y de su resolución.

Dominios espacial y temporal

Los dominios espacial y temporal deben adecuarse a los propuestos en la Sección 2 de estas Recomendaciones,

- (a) dominio espacial: dique, tramo, subsistema, conjunto de elementos, entre otros;
- (b) dominio temporal: ciclo vital, vida útil, fases de proyecto, año, ciclo estacional, ciclo de solicitud o de operatividad, estado meteorológico, secuencia de olas, entre otros.

En general, la optimización técnico-económica del dique se inscribe en su ciclo vital, incluyendo todas las fases de proyecto, y se aplica a cada uno de los tramos del dique.

Identificación de los factores de proyecto

Una forma de identificar y ordenar los factores de proyecto (parámetros, agentes y acciones) que intervienen en la formulación y resolución del problema de optimización técnico-económica es la siguiente:

- (a) Factores a optimizar. Su valor medio (u otro descriptor estadístico) se determina en la optimización de la función objetivo. En general, son dimensiones de elementos, subsistemas o partes de la obra.
- (b) Factores que se prescriben previamente o vienen impuestos por la normativa y no se optimizan; p. ej., costes unitarios, propiedades de los materiales, etc.
- (c) Parámetros de los modelos de probabilidad de los factores de proyecto que se consideran variables aleatorias.
- (d) Factores dependientes, o no básicos, que se pueden expresar en función de los factores de proyecto anteriores.

Inicialmente, todos los factores de proyecto se pueden considerar variables aleatorias; en este caso, los factores de proyecto deterministas son un caso particular de aquellas.

Función objetivo

En general, la función objetivo para un dique de abrigo es un descriptor estadístico del coste total (acumulado) del tramo o dique en su ciclo vital. Este coste total se determina por la suma de costes en todas las fases de proyecto: inicial de construcción, de conservación y explotación, en su caso, de desmantelamiento, de reparación, y por el cese e influencia de las actividades económicas directamente relacionadas con la obra, ya sean oferentes de servicios creados tras su puesta en servicio o demandantes.

Por el carácter aleatorio de los agentes climáticos y de la respuesta del dique, el coste total acumulado es una variable aleatoria con un modelo de probabilidad que evoluciona con el tiempo y se puede determinar de acuerdo con lo expuesto en el Artículo 5.3.1 de esta sección.

Una manera de relacionar la optimización técnico-económica y el análisis de sostenibilidad financiera propuesto en MEIPOR-16 es definir como función objetivo el descriptor coste esperado del tramo o dique en un año. Este coste se obtiene por la suma del coste esperado de los daños anuales y el coste anual equivalente de la inversión. Para facilitar su cálculo suele adoptarse la hipótesis de independencia estadística de los años del ciclo vital, tal y como se detalla en el apartado 2.5.4.3 de la ROM 1.0-09.

La función objetivo en cualquiera de los dominios espaciales y temporales que se identifican en el proyecto del dique se define en función de los fines de la optimización.

Restricciones a la optimización de la función objetivo

La optimización técnico-económica del dique (p. ej. minimizar el coste total del proyecto) está sujeta a restricciones de carácter técnico y económico, así como a restricciones legales, sociales y ambientales.

En general, las restricciones técnicas se imponen para acotar el comportamiento del dique frente a la seguridad y la operatividad y su coste. Entre otros, se proponen los siguientes grupos de restricciones,

- (a) en los coeficientes de la ecuación de verificación de cada modo principal de fallo o de parada,
 - coeficientes de seguridad global
 - coeficientes parciales
- (b) en la probabilidad de ocurrencia de un modo y del conjunto de modos principales especificadas en la ROM 0.0-01 y en esta ROM 1.1-18,
 - reparto de la probabilidad conjunta por modos independientes
 - probabilidad conjunta de fallo o parada acotada (apartado 7.5 de la ROM 0.0-01), o su equivalente la tasa anual de ocurrencia del modo en la vida útil (bajo ciertos supuestos)
- (c) múltiples, combinando coeficientes y probabilidad de ocurrencia,
 - coeficientes de seguridad global o parciales y el índice de fiabilidad del modo
 - coeficientes de seguridad global o parciales y la tasa anual de ocurrencia del modo
- (d) en el dominio de variabilidad del descriptor estadístico de los costes totales y su dominio espacio-temporal
 - coste total (valor medio y desviación estándar) del Proyecto de Construcción acotado, en su ciclo vital, o el coste medio anual acotado (Mínguez et al., 2006)
 - coste total acotado en una fase, p. ej. construcción o reparación (Mínguez et al., 2006)

Hipótesis del modelo de optimización

Para resolver el problema de optimización del diseño de un dique es necesario adoptar algunas hipótesis y simplificaciones que bien reducen su complejidad, bien los tiempos de ejecución. Entre ellas,

- (a) la independencia estadística de los ciclos de sollicitación y operatividad y los umbrales, las variables que los describen y los modelos de probabilidad que se consideran,
- (b) la evaluación del incumplimiento de los requisitos de proyecto mediante modos de fallo y de parada y sus ecuaciones de estado,
- (c) la evolución espacio-temporal de los modos y su desencadenamiento y progreso,
- (d) las estrategias y procesos de construcción y reparación.

Método y técnica de resolución del problema de optimización

El método de resolución depende de la complejidad del problema a resolver y del grado de desarrollo del proyecto. Cuando se optimice el coste total del dique con un único modo principal de fallo, se pueden aplicar métodos

analíticos, de Nivel II o por simulaciones de Monte Carlo de los ciclos de sollicitación y operatividad en el ciclo vital de la infraestructura (Nivel III).

Si el problema de optimización incluye una función objetivo multivariada y varias restricciones independientes o condicionadas, varios modos de fallo o de parada, posiblemente sea necesario aplicar técnicas y modelos numéricos específicos, como GAMS o AIDS. En este caso es conveniente incluir el análisis de sensibilidad (ver Artículo 5.4.3) en la formulación y resolución del problema de optimización para reducir la complejidad y el número de variables que forman parte en la misma.

5.4.2 Método simplificado de optimización

Las bases de proyecto de un dique de abrigo derivadas de la ROM 0.0-01 y ampliadas en esta ROM 1.1-18 para su aplicación al Proyecto de Construcción de diques de abrigo permiten plantear de forma unificada un método de optimización técnico-económica que, además, facilita una comparación objetiva y homogénea de datos y diseños de alternativas y selección de soluciones. Este método es adecuado para la optimización de los proyectos de Clase I e IRE < 20 e ISA < 20 (Artículo 5.4.5).

Los fundamentos y las hipótesis más relevantes de este método analítico son los siguientes:

1. Una tipología de dique de abrigo poco rebasable pertenece a un conjunto conexo de tipologías que se describe mediante las dimensiones de sus partes principales, elementos y subelementos y las características de los materiales con los que se construye.
2. La interacción del dique con el tren incidente del oleaje se describe por los procesos de partición de la energía incidente mediante funciones simples.
3. Las funciones de probabilidad de los descriptores estadísticos del oleaje en el frente y sobre el dique se pueden definir en función de sus correspondientes modelos a pie de dique, y éstos en función de sus correspondientes modelos en aguas profundas.
4. Los modos de fallo del subsistema exterior son los modos principales del dique y una de las fuentes principales de la incertidumbre del proyecto.
5. Cada uno de estos modos se describe por una ecuación de verificación que depende de los descriptores locales (de punto) del estado meteorológico de diseño.
6. El inicio y la evolución espacio-temporal de la avería de cada modo se puede describir por una función acumulativa dependiente de la excedencia y la duración de los descriptores locales del estado meteorológico de diseño y de las posibles estrategias de reparación.
7. El coste de reparación de cada modo de fallo del subsistema exterior se puede describir por una función acumulativa dependiente de la excedencia y la duración de los descriptores locales del estado meteorológico de diseño y de las posibles estrategias de reparación.
8. El coste total del dique en su vida útil se calcula como la suma del coste de construcción de los subsistemas exterior e interior y cimentación y terreno, que depende del dimensionamiento inicial, y los costes probables de reparación debidos a las averías producidas en el sistema exterior y sus posibles estrategias de reparación.
9. Las estrategias de reparación, cuándo, cuánto y cómo, son elementos de decisión en el problema de optimización.

De esta forma se obtiene una expresión analítica del coste total (acumulado) de una tipología en un tramo de dique y las dimensiones geométricas del subsistema exterior expresada en función de los descriptores del estado meteorológico (principalmente la altura de ola media cuadrática) a pie de dique, o en aguas profundas.

Esta función se puede minimizar con respecto al oleaje a pie de dique, o en aguas profundas, con ciertas restricciones relacionadas, entre otros, con los requisitos de proyecto, el desencadenamiento y propagación de los modos de fallo, las estrategias de reparación del tramo y el coste total de la inversión. Si la optimización se efectúa para un diseño a evolución de avería, se puede plantear también en términos del tiempo de supervivencia.

Este método analítico admite una formulación de complejidad creciente a medida que se avanza en el grado de desarrollo del Proyecto de Construcción y converge al método general a medida que se incorporan nuevos modos, subsistemas y sus relaciones al análisis.

5.4.3 Análisis de sensibilidad del diseño del dique

El análisis de sensibilidad permite conocer cómo varía el diseño y el dimensionamiento del dique y tramo al variar los valores de algunos de los factores de proyecto. En concreto este análisis, ejecutado simultáneamente con la optimización o a continuación de él,

- (a) informa sobre la participación de diferentes factores de proyecto en el inicio y propagación de un modo de fallo o de parada en un tramo, en una parte de él o en uno de sus subsistemas,
- (b) orienta en la transformación de modos principales en no principales en un subsistema o en un tramo,
- (c) cuantifica la importancia de los modos principales de un subsistema en el coste total en el ciclo vital y en el coste anual equivalente del tramo, y
- (d) cuantifica la importancia de la tramificación del dique y de sus tipologías en el coste total en el ciclo vital y en el coste anual equivalente del dique.

Técnica de resolución

En general, la resolución del análisis de sensibilidad del coste total o anual equivalente se apoyará en la técnica de simulación de Monte Carlo, o en métodos avanzados de optimización resolviendo ambos problemas de forma simultánea.

Cuando se analice el comportamiento de un único modo (por ejemplo en los Estudios Previos y, en algunos casos, en los Estudios de Alternativas y de Soluciones) o su evolución espacio-temporal, se puede resolver el estudio de sensibilidad aplicando un método de Nivel II, apartado 6.3 de la ROM 0.0-01. El resultado de la aplicación del método puede ser, bien el punto crítico de fallo, bien el índice de fiabilidad y la probabilidad de fallo o parada, o bien los índices de sensibilidad de los factores que intervienen, apartado 6.6 de la ROM 0.0-01.

5.4.4 Secuencia para la optimización y análisis de sensibilidad técnico-económica del coste del dique en el ciclo vital

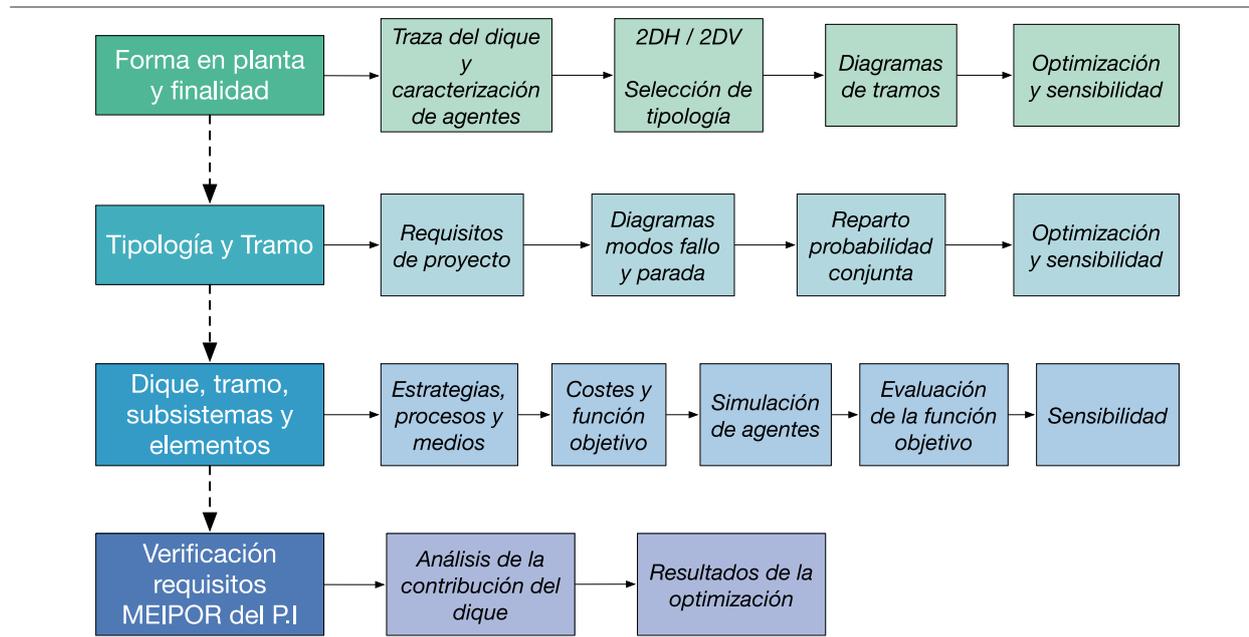
A continuación se detalla la secuencia de tareas a realizar en el proceso de optimización del diseño y dimensionamiento de un dique de abrigo y de sus tramos, definiendo la función objetivo por el Coste Total del Proyecto de Construcción sujeta a la restricción de la probabilidad conjunta de fallo de los modos principales (figura 5.10). La importancia y alcance de esta secuencia depende del grado de desarrollo del proyecto. Esta secuencia es similar, aunque ampliada, a la recogida en el capítulo 9 “Design of breakwaters based on life-cycle analysis” de PIANC, 2016.

- (a) Para cada forma en planta y finalidad del dique con respecto al área portuaria
 1. Tramificación de la traza del dique y caracterización de los agentes climáticos, terreno, uso y explotación y materiales.
 2. Análisis 2DH y 2DV y selección de las tipologías posibles.
 3. Configuración de los diagramas de tramos en función de la finalidad del dique.
 4. Optimización y análisis de sensibilidad de la disposición del dique y sus tramos.
- (b) Para cada tipología y tramo
 5. Cálculo de los requisitos de proyecto.
 6. Comportamiento hidrodinámico de la sección, conceptualización del diseño y configuración de diagramas de modos de fallo y de parada.
 7. Reparto a priori de la probabilidad conjunta de fallo y predimensionamiento de la sección.
 8. Optimización y análisis de sensibilidad de cada tipología en cada tramo.

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- (c) Para el dique, sus tramos, subsistemas y elementos
9. Especificación de estrategias, procesos y medios de construcción, conservación y reparación.
 10. Especificación de costes y selección de la función objetivo y sus restricciones.
 11. “Simulación” de los agentes climáticos en presencia del dique y sus tramos.
 12. Evaluación de la función objetivo en cada tramo y optimización.
 13. Análisis de sensibilidad por tramos, partes, subsistemas y elementos.
- (d) Verificación de los requisitos MEIPOR del Proyecto de Inversión del dique
14. Análisis de la contribución del dique a los objetivos de rentabilidad financiera de la inversión y del capital, al análisis de rentabilidad económica y a la sostenibilidad financiera del Proyecto de Inversión.
 15. Incorporación de los resultados de la optimización económico-financiera obtenidos en el ámbito de la aplicación de MEIPOR y reformulación, en su caso, de los requisitos de proyecto y restricciones del problema de optimización.

Figura 5.10: Secuencia de tareas del proceso de optimización del diseño y dimensionamiento de un dique de abrigo



5.4.5 Modelo de Optimización recomendado del coste acumulado

La complejidad y el tiempo necesario para la realización de la optimización y del análisis de sensibilidad y riesgo son crecientes con

- (a) la cuantía económica y la relevancia social y ambiental del Proyecto de Inversión y
- (b) el carácter del dique de abrigo y su relevancia en los objetivos del Proyecto de Inversión.

De acuerdo con **MEIPOR-16**, la cuantía económica y la relevancia social y ambiental del Proyecto de Inversión determina si éste debe incorporar, o no, los estudios y análisis indicados en el documento. Por otro lado, el carácter de cada tramo, cuantificado por los índices de repercusión económica y social y ambiental, determina el método de verificación y el grado de desarrollo del Proyecto de Construcción del dique, tal y como se indica en el Artículo 1.4 y se especifica en el Artículo 4.4.

A continuación, se especifica la evaluación de los costes de proyecto, la optimización tecnoeconómica y el análisis de sensibilidad en función de los indicadores IRE e ISA y la relación entre el coste de la inversión C_1 y el parámetro económico de adimensionalización C_0 (figura 1.8).

Proyecto Clase I: $C_1 \leq C_0$. No se requiere aplicar MEIPOR.

- (a) $IRE < 20 \cap ISA < 20$. Optimización económica “simple”
 - modo de fallo principal (el que define IRE e ISA),
 - optimización tipo ELU en función del agente predominante (Suárez Bores, 1976 y PIANC, 2016) y
 - comparación con el dique que satisface los requisitos de proyecto.
- (b) $IRE \geq 20 \cup ISA \geq 20$. Optimización técnico-económica
 - requisitos de proyecto frente a la seguridad y la operatividad expresados por restricciones múltiples (coeficientes de seguridad, coeficientes parciales y probabilidad de fallo o tasa anual de fallo/temporales),
 - análisis de sensibilidad

Proyecto Clase II: $C_1 > C_0$. Se debe aplicar MEIPOR.

- (a) $IRE < 20 \cap ISA < 20$. Optimización económica “simple”
 - modo de fallo principal (el que define IRE e ISA),
 - optimización tipo ELU en función del agente predominante (Suárez Bores, 1976 y PIANC, 2016), pero acotando el coste total y el coste medio anual del Proyecto de Construcción al impuesto por MEIPOR y
 - comparación con el dique que satisface los requisitos de proyecto.
- (b) $IRE \geq 20 \cup ISA \geq 20$
 1. Optimización técnico-económica y análisis de sensibilidad con
 - restricciones múltiples frente a la seguridad y la operatividad (coeficientes de seguridad, coeficientes parciales y probabilidad de fallo o tasa anual de fallo/temporales) y modelo de evolución espacio-temporal de modos de fallo y de parada,
 - restricciones derivadas del análisis de rentabilidad financiera, económica y de sostenibilidad financiera impuestas por MEIPOR.
 2. Optimización del sistema dual de Proyectos de Construcción y de inversión y estimación de su nivel de riesgo.

5.5 ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD Y NIVEL DE RIESGO DEL PROYECTO DE INVERSIÓN

De acuerdo con MEIPOR-16 la inversión en infraestructuras portuarias debe basarse en la generación de valor y contar con mecanismos que incorporen los objetivos de servicio público y de interés general. En ese contexto, el objetivo de la aplicación del binomio ROM-MEIPOR es establecer la necesaria e ineludible conexión técnica, social, ambiental, financiera y económica en la planificación portuaria, los proyectos de construcción y la ordenación, gestión y explotación de sus infraestructuras.

Esta conexión se establece en todos los grados de desarrollo del Proyecto de Construcción, (figuras 1.8 y 1.9) se concreta cuantitativamente al resolver el sistema dual de optimización técnica y económica del dique de abrigo y de optimización financiera y económica del Proyecto de Inversión, y se acota al calcular el riesgo.

Una explicación detallada de la optimización económico-financiera se encuentra en MEIPOR-16. En este Artículo sólo se recogen los elementos de conectividad y compatibilidad en la resolución del sistema dual de optimización de los Proyectos de Construcción e Inversión.

5.5.1 La conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR

La redacción del Proyecto de Construcción del dique depende del análisis de la inversión económica, productiva y de servicio público que incluya los aspectos medioambientales y de seguridad, y que permita,

1. valorar la viabilidad del proyecto para los agentes que lo promueven y
2. optimizar la obra en su conjunto y en cada una de sus partes.

Función del dique en la viabilidad económica-financiera del Proyecto de Inversión

El análisis de la inversión se debe apoyar en una evaluación de los objetivos del proyecto y de su contexto, caracterizado por,

- (a) la promoción de oferta portuaria nueva o mejorada,
- (b) la imbricación de esa oferta en los sectores del transporte,
- (c) la logística y el comercio marítimo-terrestre, y
- (d) el marco económico-social-institucional en el que se encuadra.

La finalidad de la construcción del dique de abrigo es coadyuvar a la consecución de los objetivos del Proyecto de Inversión y, en particular, las actividades en el área portuaria con una fiabilidad y operatividad predeterminadas.

Como parte de la evaluación económico-financiera es relevante cuantificar la función que desarrolla el dique de abrigo para facilitar las actividades en el área portuaria, con una fiabilidad y operatividad determinadas, y compararla con un escenario de explotación sin la presencia del dique.

Algunos indicadores que pueden ayudar a tomar la decisión sobre la conveniencia, o no, de su construcción son,

- (a) inversión total del proyecto,
- (b) variación de los ingresos netos anuales, y
- (c) sensibilidad de la rentabilidad económica y financiera,

evaluados para dos escenarios de proyecto, con y sin dique. Si el escenario más favorable es construir el dique, es pertinente acotar el coste total del dique y asignar la cuota de riesgo asociado del mismo en el proyecto de inversión.

A tal efecto, en los diferentes grados de desarrollo del Proyecto de Construcción se evalúan los costes totales del dique, incluyendo los costes estimados de reparación, y los costes asociados a las pérdidas por falta de operatividad.

5.5.2 Adecuación y optimización del Proyecto de Inversión

Los objetivos del Proyecto de Inversión se concretan en,

- ◆ la evaluación de la rentabilidad financiera tanto del proyecto como del capital puesto a disposición para su promoción,
- ◆ el análisis económico de los efectos que genera el proyecto sobre todos los agentes, tráfico y operaciones relacionadas, y
- ◆ la probabilidad de que el proyecto siga alcanzando un rendimiento adecuado, aunque las condiciones de futuro o las hipótesis de cálculo fueran diferentes de las inicialmente consideradas.

El proyecto de inversión portuario se considera adecuado (es una solución posible) cuando cumple los requisitos mínimos **MEIPOR-16**, o sus equivalentes en la herramienta de análisis económico y financiero considerada,

- (a) valor Actual Neto Financiero del Capital-VANF (C) del Inversor/Operador partícipe positivo,
- (b) sostenibilidad financiera del proyecto para la Autoridad Portuaria y el Inversor/Operador, partícipe correcta,
- (c) valor Actual Neto Económico del Proyecto-VANE (I) positivo.

Para declarar adecuado el Proyecto de Inversión, **MEIPOR-16** incluye, además, unos umbrales previamente establecidos del nivel de riesgo. En general, la consecución de estos requisitos se puede alcanzar con diversas alternativas de proyecto, pero algunas de ellas optimizan una función objetivo, satisfaciendo ciertas restricciones lo que las hace más atractivas para su desarrollo e implementación.

Elementos para una optimización económico-financiera

Al igual que la optimización técnico-económica, la optimización económico-financiera del Proyecto de Inversión debe incluir, al menos, los siguientes elementos,

- (a) los dominios espacial y temporal en los que se define el problema,
- (b) los factores de proyecto,
- (c) la función objetivo uni- o multivariada,
- (d) las restricciones, y
- (e) las hipótesis del modelo y de su resolución.

La secuencia de trabajo en la que se desarrolla MEIPOR contiene la información necesaria para definir y acotar los elementos del problema de optimización económico-financiera.

5.5.3 Sistema dual de Optimización y nivel aceptable de riesgo

Si bien MEIPOR y el Programa ROM comparten metodologías y grados de desarrollo del proyecto, difieren en algunos aspectos de la organización espacio-temporal de los factores de proyecto y en su descripción por modelos de probabilidad. En ningún caso estos aspectos impiden la formulación concomitante de las funciones objetivo y de las restricciones compartidas y su resolución mediante un proceso iterativo.

La función objetivo y las restricciones del problema de optimización financiero-económica se pueden formular en función de los indicadores de las rentabilidades financieras y económicas del proyecto y del capital y de sus costes.

En MEIPOR-16 se evalúa el riesgo de la inversión a partir de la probabilidad de que los indicadores de rentabilidad económica y financiera del proyecto tengan un valor menor (o mayor según el indicador considerado) que un valor de referencia considerado "crítico". El riesgo se considera asumible cuando dicha probabilidad es inferior a un valor de referencia (nivel de riesgo aceptable). El cálculo del nivel de riesgo aplicando modelos de probabilidad se recoge en el apartado 3.6 de MEIPOR.

5.5.4 Indicadores de la conectividad ROM 1.1-18-MEIPOR

El resultado final del sistema dual de optimización debe ser la estimación del nivel aceptable de riesgo del Proyecto de Inversión y la contribución al mismo del dique de abrigo tal y como se propone en el Anteproyecto y se define de forma completa en el Proyecto de Construcción, incluyendo las estrategias (escenarios) de construcción y reparación, y el análisis de riesgos por incumplimiento de los objetivos y finalidad del dique.

EJEMPLO

CÁLCULO DE LA FDP DE LA RENTABILIDAD DEL PROYECTO DE INVERSIÓN EN FUNCIÓN DEL NIVEL DE AVERÍA DEL DIQUE DE ABRIGO

Si el Proyecto de Inversión es de Clase II el proyecto del dique debe adecuarse a las conclusiones y recomendaciones obtenidas en MEIPOR. En estas condiciones la optimización dual es una herramienta de ayuda imprescindible para diseñar el dique que mejor sirve a las necesidades del área portuaria en su vida útil u en otros dominios temporales, por ejemplo, tiempo concesional, periodo de pago del préstamo, etc. MEIPOR aplica un conjunto de ecuaciones funcionales de factores de proyecto (agentes, acciones y términos del funcional) que evolucionan, o no, en el tiempo para obtener diferentes indicadores del comportamiento económico y financiero del proyecto de inversión.

Los valores de los factores se ajustan a los descritos en el capítulo 3, apartado 3.8.1 de la ROM 0.0-01, sin modelo de probabilidad, valor nominal, representativo o característico, con o sin valores superior e inferior de intervalo de confianza. Sólo, en algunos casos particulares, se propone la selección del valor del factor de proyecto a partir de su función de probabilidad.

Si se conocieran los modelos de probabilidad conjunta de los factores de proyecto, el análisis de los objetivos del Proyecto de Inversión (a través de los valores de sus indicadores) se puede formular y resolver, de forma general, en un intervalo de tiempo. El resultado sería la probabilidad conjunta (fiabilidad) de cumplimiento de los objetivos en aquel intervalo de tiempo, tal y como se indica en el apartado 6.2 de la ROM 0.0-01.

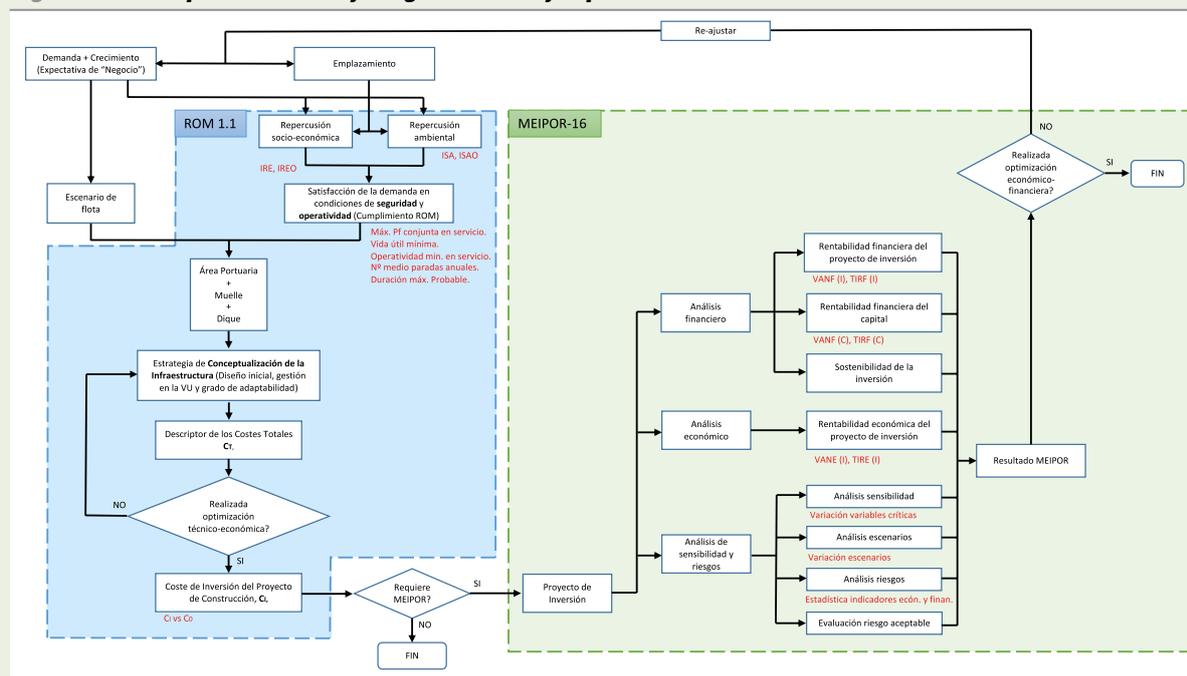
De forma análoga a la verificación de los requisitos de proyecto de un Proyecto de Construcción el planteamiento global puede resultar complejo o, en algunos casos, inviable. Una manera de solventar estas dificultades es segregar el problema en subproblemas en función de los objetivos y los factores de proyecto y resolver cada uno de ellos con hipótesis adicionales.

Los Proyectos de Construcción asociados a un Proyecto de Inversión de Clase II abordados con métodos de verificación de Nivel II y III son un buen ejemplo de cómo los requisitos de fiabilidad y operatividad en la vida útil se transfieren a los requisitos del Proyecto de Inversión y a la toma de decisiones a través del análisis de los costes totales de la infraestructura.

En este ejemplo se calculan los modelos de probabilidad de los indicadores de rentabilidad económica y financiera dependientes del comportamiento del dique frente a la seguridad y la operatividad de una terminal de contenedores (de tamaño pequeño) en función de su capacidad de atender tres supuestos de demanda identificados de forma cualitativa por decreciente, crecimiento moderado y gran crecimiento. El planteamiento, la justificación, el detalle de los cálculos y los resultados para otros tamaños de terminal se encuentran en (IH Cantabria y McValnera, 2018).

En la figura 5.11 se resume el esquema de trabajo seguido en este ejemplo de aplicación del sistema dual ROM 1.1-18-MEIPOR 2016.

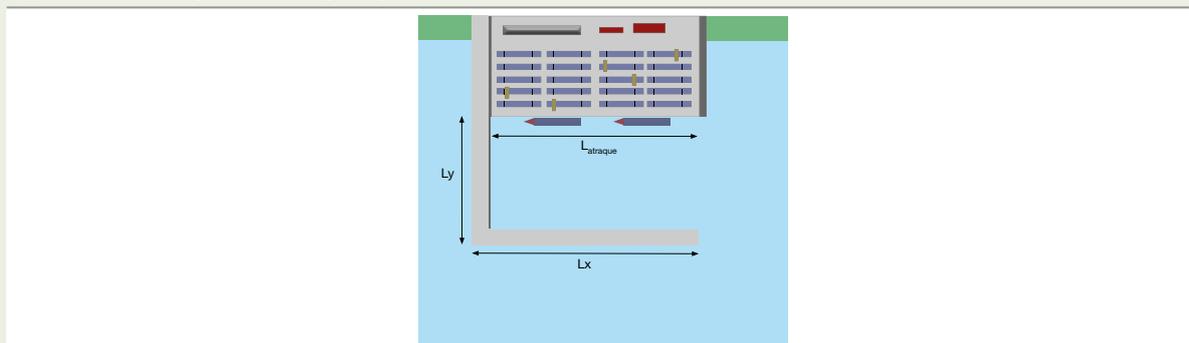
Figura 5.11: Esquema de trabajo seguido en el ejemplo



Criterios de diseño de una terminal pequeña

Se diseña para atender, al inicio de la concesión, una demanda de 160.000 TEUs mediante buques tipo Panama-max en dos atraques debidamente habilitados para su correcto funcionamiento (figura 5.12). Además, la carga por escala es constante durante la vida de la concesión y se fija una tasa de crecimiento o decrecimiento anual constante del número de escalas. La longitud de la línea de atraque es de 480 m.

Figura 5.12: Croquis de atraques y dimensiones



De forma cualitativa se definen tres escenarios de demanda:

- ◆ demanda decreciente hasta los 80.000 TEUs al final de la vida de la concesión (caso 1),
- ◆ demanda con crecimiento moderado hasta alcanzar los 220.000 TEUs al final de la vida de la concesión (caso 2), y
- ◆ demanda con gran crecimiento hasta alcanzar los 360.000 TEUs al final de la vida de la concesión (caso 3).

Los niveles de servicio de la terminal se pueden ver en la figura 5.13 (adaptado del Manual de Capacidad portuaria de la Fundación ValenciaPort).

Figura 5.13: Niveles de servicio frente a productividad anual media

Nivel de servicio	Espera relativa	NIVELES DE SERVICIO			
D	> 0,20				
C	0,10 - 0,20				
B	0,05 - 0,10				
A	hasta 0,05				
		< 35	35 - 50	50 - 65	> 65
		Productividad anual media de buque atracado (P) (cont./h)			
		D	C	B	A
		Nivel de servicio			

Criterios de diseño de un dique exterior

En la figura 5.12 se representa la forma en planta del dique exterior y se acota su geometría y la de sus tramos. En función del IRE e ISA, IREO e ISAO se determinan los siguientes requisitos de proyecto,

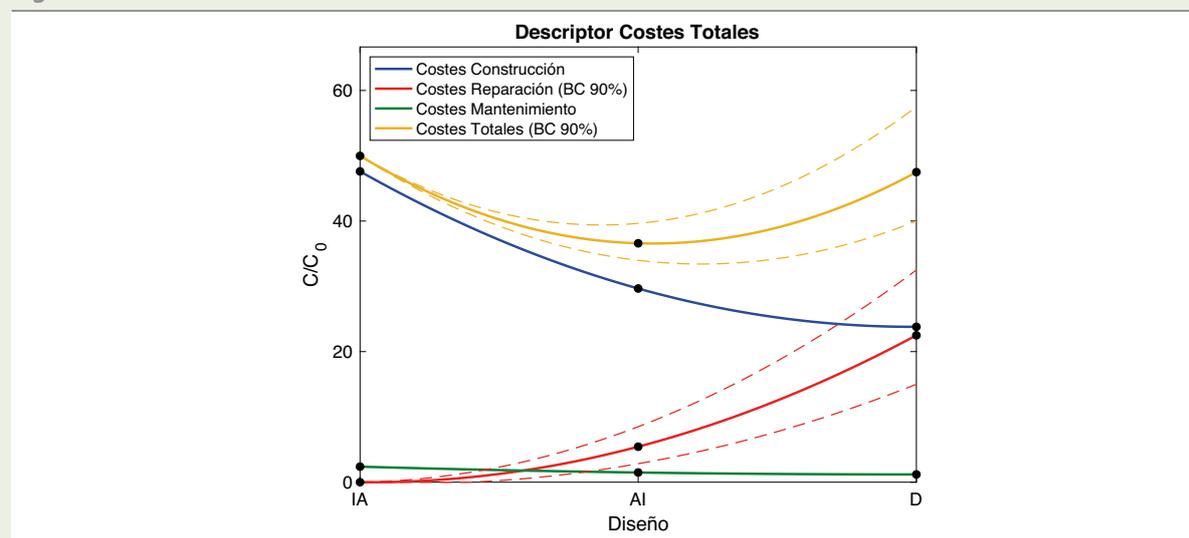
- (a) Vida útil: > 50 años,
- (b) Probabilidad conjunta de modos de fallo principales: $p_f < 0.10$
- (c) Operatividad (anual): $p_0 > 0.95$

La longitud de las alineaciones principal y secundaria se determinan en función de los requisitos de operatividad, $L_x = 2100$ (m) y $L_y = 370$ (m) respectivamente. El calado mínimo en el área portuaria es de 15 m.

La tipología de todos los tramos del dique es en talud y el diseño de la sección se formula según una Variante *ad hoc*, intermedia entre las Variantes 1 y 2. A tal efecto se definen tres niveles de avería (IA), (AI) y (D) del modo principal de fallo (extracción de piezas del manto principal). Se supone que se repara cuando se alcanza (AI) sin limitaciones técnicas o económicas y que no hay afección de la operatividad. En la figura 5.14

se representan las curvas de variación de los costes totales (suma de construcción, conservación y reparación) adimensionalizados por el coste unitario C_0 (de referencia) en función del nivel de avería (identificado como (IA), (AI) y (D)). BC indica las bandas de confianza.

Figura 5.14: Variación de los costes totales frente al nivel de avería de diseño

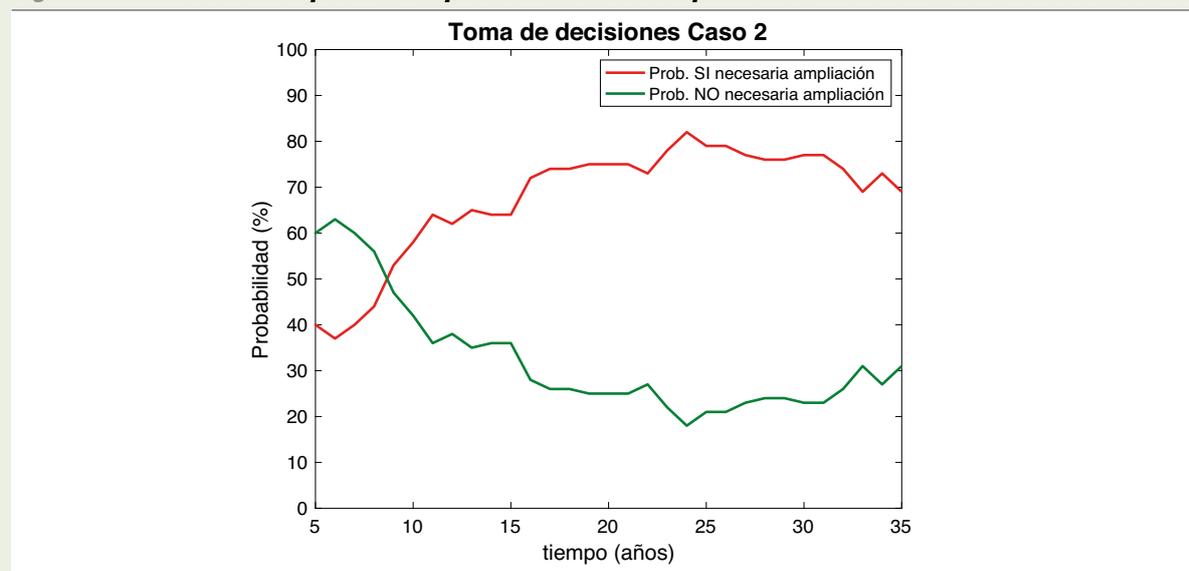


Los resultados se obtienen mediante simulación de Monte Carlo de la operatividad de la terminal (régimenes medios de los estados meteorológicos) y del comportamiento hidrodinámico del dique (régimenes de extremos de los estados meteorológicos).

Resultados

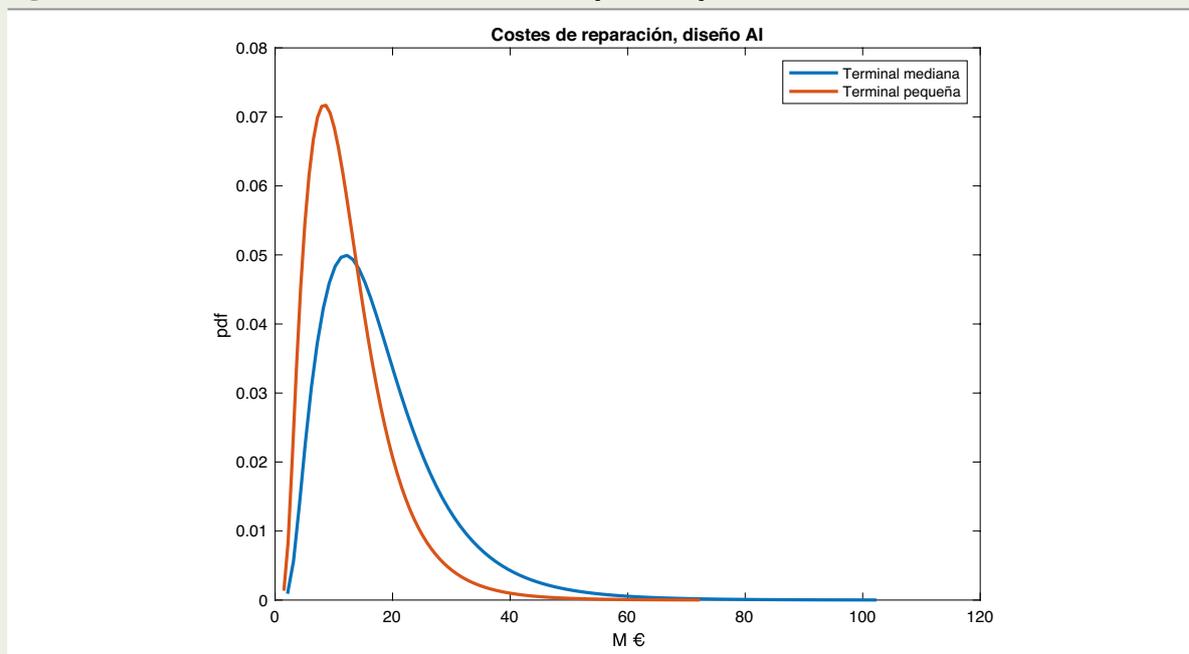
En la figura 5.15 se representa la evolución temporal de las probabilidades de cumplir con el crecimiento estimado de la demanda (caso 2) y de la necesidad de la ampliación por ofrecer el nivel de servicio adecuado. El punto de cruce de ambas curvas ocurre alrededor de los ocho años.

Figura 5.15: Evolución temporal de las probabilidades de cumplimiento en función de la toma de decisiones



En la figura 5.16 se representa la fdp de los costes de reparación del dique (terminales mediana y pequeña). La diferencia entre la disposición en planta y las dimensiones de la sección se refleja en la forma de la función.

Figura 5.16: Función de densidad de los costes de reparación para diseño a nivel de Avería



En las figuras 5.17, 5.18 y 5.19 se representan las fdp del TIRF de la AP y del Operador y el TIRE respectivamente para las tres hipótesis de evolución temporal de la demanda, respectivamente. Se incluye en las tres figuras la tasa de descuento.

Figura 5.17: Función de densidad del TIRF de la Autoridad Portuaria para los tres casos

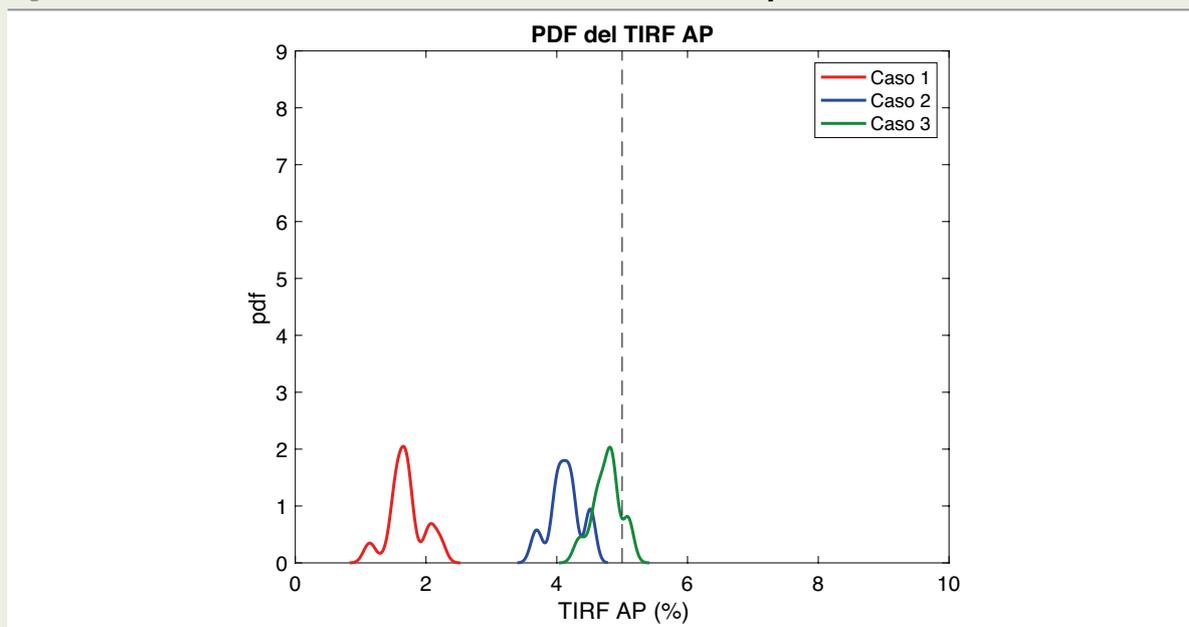


Figura 5.18: Función de densidad del TIRF del Operador para los tres casos considerados

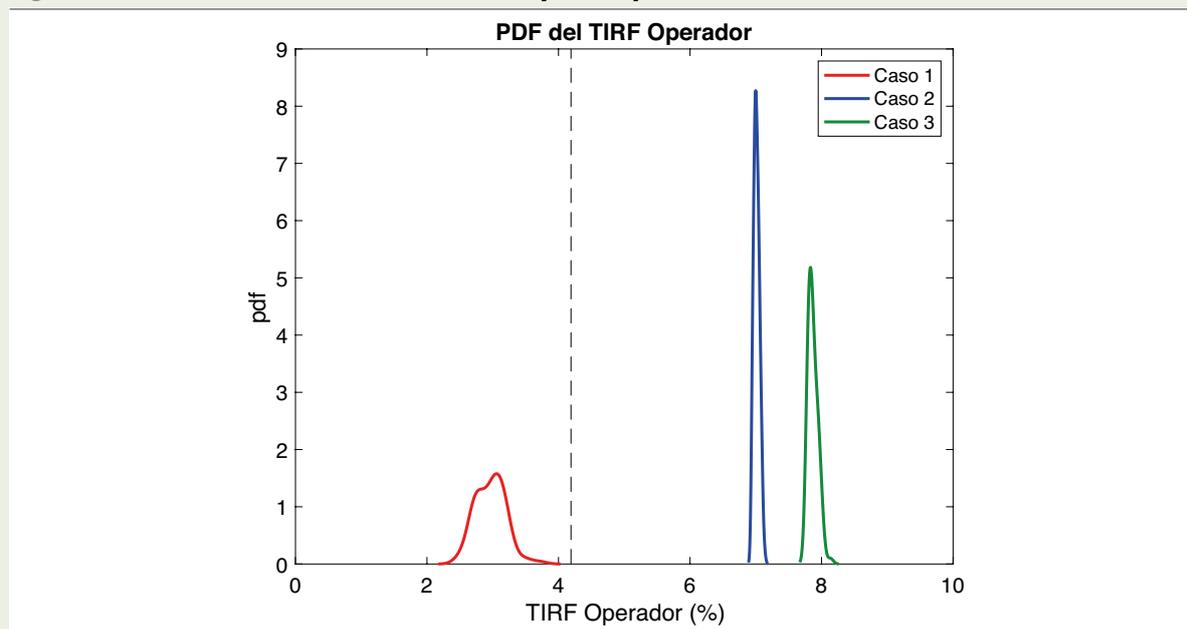
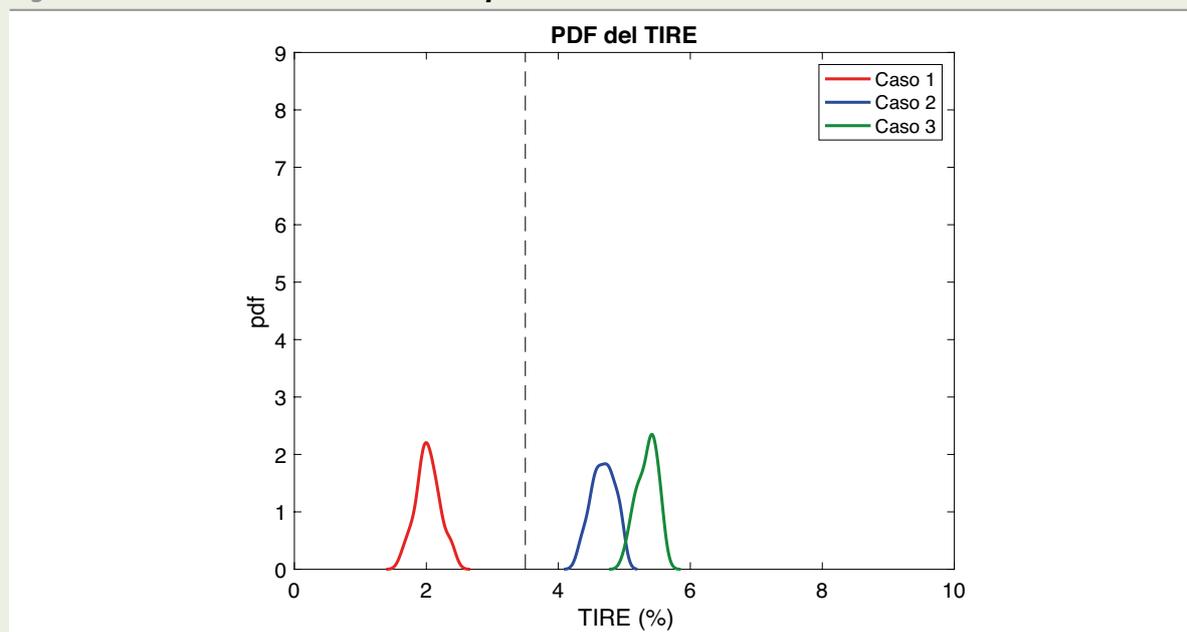


Figura 5.19: Función de densidad del TIRE para los tres casos considerados



En la figura 5.20 se presentan los resultados del análisis de la sensibilidad de algunos indicadores del Proyecto de Inversión debidas a desviaciones, pesimista y optimista modeladas mediante un incremento o decremento de un veinte por ciento del coste de construcción y se comparan con la hipótesis neutra (sin desviaciones de lo previsto). La tabla recoge los valores de elasticidad de los indicadores económicos y financieros para el supuesto (caso 2) de crecimiento moderado de la demanda. Se destaca en rojo los que son mayores que 1.

Figura 5.20: Resultados del análisis de sensibilidad para situaciones optimista y pesimista

CASO 1		
	PESIMISTA	OPTIMISTA
Elasticidad del VANF AP	2.91	2.91
Elasticidad del TIRF AP	3.59	4.87
Elasticidad del VANF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del TIRF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del VANE	3.93	3.93
Elasticidad del TIRE	2.24	2.78

CASO 2		
	PESIMISTA	OPTIMISTA
Elasticidad del VANF AP	8.82	8.82
Elasticidad del TIRF AP	1.48	2.01
Elasticidad del VANF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del TIRF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del VANE	3.81	3.81
Elasticidad del TIRE	0.99	1.22

CASO 3		
	PESIMISTA	OPTIMISTA
Elasticidad del VANF AP	30.23	30.23
Elasticidad del TIRF AP	1.29	1.75
Elasticidad del VANF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del TIRF Oper	0.00	0.00
Elasticidad del VANE	2.26	2.26
Elasticidad del TIRE	0.86	1.07

En este ejemplo se trasvasa la incertidumbre asociada al comportamiento del dique frente a la seguridad en los resultados económicos y financieros, para unos supuestos de diseño. Este esquema segregado de cumplir los objetivos del Proyecto de Inversión es útil y simple de implementar para obras de infraestructura cuyo proyecto de Construcción se ejecute aplicando métodos de Nivel II o III.

No obstante, en España, la implementación del sistema dual en su formato integral (sin segregaciones) depende de la carga de trabajo y, en consecuencia, función del tiempo de ejecución y del presupuesto de conocimiento, método y modelo e información disponible.

5.6 CONDICIONES DE TRABAJO EXCEPCIONALES Y EL ANÁLISIS DE ACCIDENTALIDAD

El sistema dual ROM-MEIPOR está concebido para evaluar las inversiones de las infraestructuras del transporte marítimo cumpliendo los condicionantes y los requisitos de proyecto establecidos en la ROM 0.0 y otros documentos ROM en condiciones de trabajo operativas normales CT_1 y extremas CT_2 (capítulo 4, ROM 0.0-01).

Por su rareza, en ninguno de los dos documentos se abordan específicamente los proyectos de Inversión y de Construcción en condiciones de trabajo excepcionales $CT_{3,1}$, bien fortuitas del medio físico o bien accidentales, ni las condiciones post-excepcionales (operativas $CT_{1,3}$ y extremas $CT_{2,3}$) derivadas de su ocurrencia. Sin embargo, su rareza no excluye la necesidad de su consideración, en particular cuando su ocurrencia puede acarrear pérdida de vidas humanas, o daños irreversibles en el ambiente y los ecosistemas.

5.6.1 Análisis de la accidentalidad

Su objetivo es analizar y cuantificar los riesgos por accidente (origen natural, error humano, fallo del sistema, etc.) de las infraestructuras del transporte en todas sus fases de proyecto y sus consecuencias. En concreto,

- ◆ identificar y clasificar los accidentes potenciales en función de su severidad y sus consecuencias,
- ◆ predecir la frecuencia con la que pueden ocurrir,
- ◆ analizar la forma de prevenir los accidentes potenciales y transferir sus resultados al proyecto de construcción para, en su caso, considerarlos,
- ◆ desarrollar protocolos de seguridad frente a las condiciones de trabajo fortuitas del medio físico y accidentales.

En zonas litorales en las que la probabilidad de presentación de movimientos sísmico o de maremotos, aunque pequeña, no sea despreciable (de acuerdo con los mapas de peligrosidad elaborados en la UE), es recomendable acometer un análisis de accidentalidad del área portuaria y de la incidencia de la infraestructura proyectada. A estos efectos es conveniente que en los Estudios de Planificación y el Plan Director de Infraestructuras se consigne la pertinencia o no de la elaboración del análisis de accidentalidad.

Los resultados del análisis se pueden concretar mediante dos índices,

- ◆ accidentalidad y sus consecuencias,
- ◆ percepción social con respecto a su aceptación como hecho “asumible” o “inadmisibles”.

Este análisis debe formularse admitiendo que el riesgo cero no existe y que, en la mayoría de los casos, la reducción del índice de accidentalidad o de las consecuencias se puede cuantificar en términos monetarios; debe apoyarse en un estudio de costes de oportunidad que considere la evolución del estado de opinión de la ciudadanía al respecto.

Métodos para el análisis de la accidentalidad

Para analizar la evolución temporal del dique frente a la seguridad y la operatividad, en la Sección 2 de esta ROM 1.1-18 se propone la utilización de árboles de desencadenamiento y propagación del daño, y árboles de decisión. Estos árboles son de ayuda para especificar las dependencias entre los distintos factores de proyecto. Por su estructura abierta para reproducir los estados de fallo o de parada, se requiere simular el conjunto de las variables intervinientes.

El análisis de la accidentalidad está condicionado por la rareza del suceso, que se manifiesta por la escasa (o nula) información disponible. Por ello, uno de los métodos más adecuado es la red bayesiana que utiliza grafos dirigidos que, a diferencia de los árboles, se pueden cerrar. Además, la probabilidad conjunta de todas las variables se puede definir mediante las probabilidades condicionales de cada nodo dados sus antecesores.

COMENTARIO

Durante la aplicación de la ROM 3.1-99, Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación, se detectó que los métodos de dimensionamiento de estas infraestructuras no incorporaban un análisis de accidentalidad. En general, la propuesta es transferir el tema a estudios posteriores orientados a implantar procedimientos operativos (Sanchidrián, 2001). En ese artículo se desgranar una serie de opciones que pueden servir de ayuda para el planteamiento y formulación de un análisis de accidentalidad de otras infraestructuras marítimas y, en particular, de un dique de abrigo.

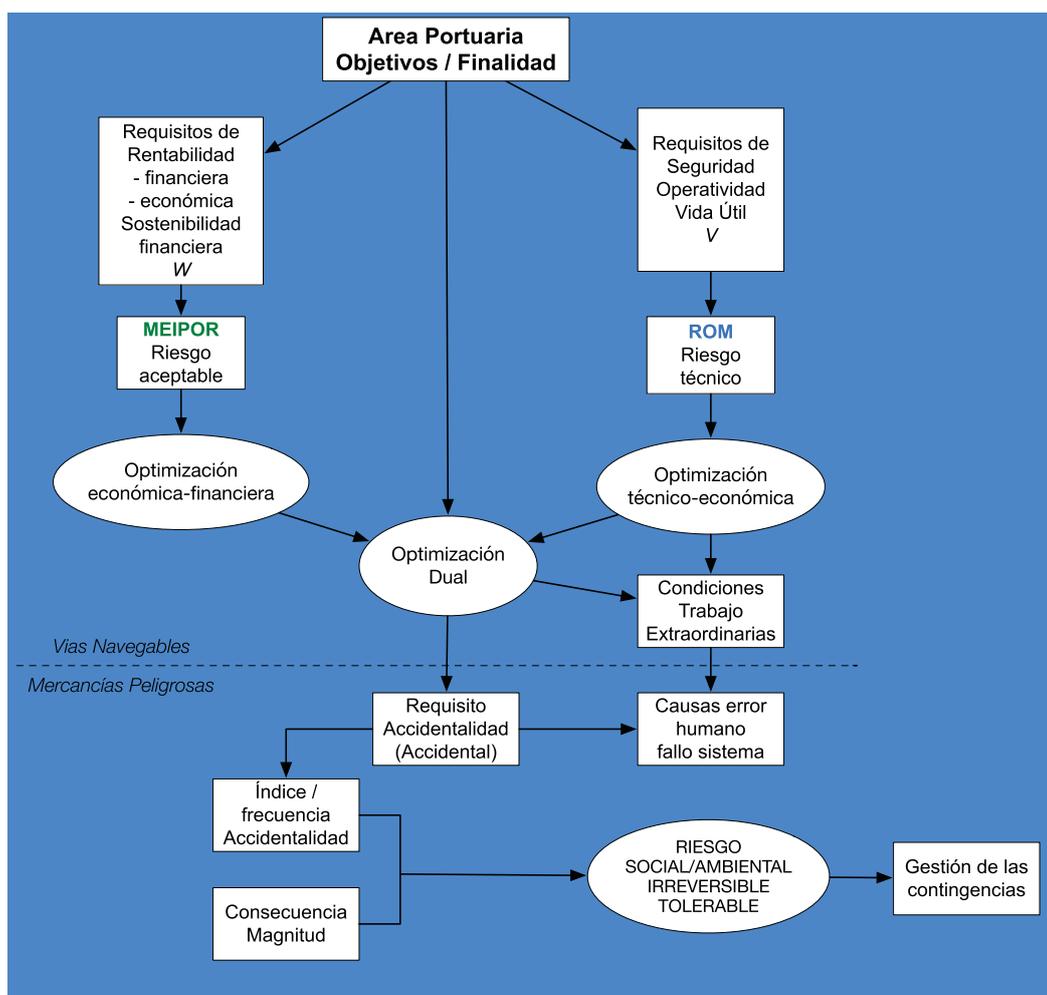
La triada metodológica

Cuando sea necesario analizar la accidentalidad en el área portuaria en presencia de la infraestructura, el método de trabajo incluye las tres herramientas descritas en este documento,

- ◆ MEIPOR (2016): Manual de Evaluación de las Inversiones de Infraestructuras Portuarias con el objetivo de analizar la rentabilidad económica y financiera, y la sostenibilidad financiera y el riesgo de la inversión.
- ◆ ROM 1.1-18: Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo con el objetivo de redactar y ejecutar proyectos de construcción de infraestructuras optimizadas técnica y económicamente, acotando el riesgo frente a su seguridad y la operatividad.
- ◆ Condiciones de trabajo excepcionales: Método de análisis de la accidentalidad de las infraestructuras con el objetivo de cuantificar y prevenir el riesgo de pérdida de vidas humanas, especies protegidas y daños irreversibles en el ambiente.

La aplicación conjunta e integrada de estas tres herramientas de trabajo, figura 5.21, facilita la aplicación de técnicas multicriterio para el análisis y la toma de decisiones y, consecuentemente, la asignación y la distribución de las responsabilidades relacionadas con cada uno de estos actos.

Figura 5.21: Organigrama de interconexión de las tres herramientas de trabajo



Índice Anejos

ANEJOS

SÍMBOLOS Y DEFINICIONES.....	189
Símbolos.....	189
Acrónimos.....	193
Definiciones.....	194
COMENTARIOS Y EJEMPLOS.....	207
Comentarios.....	207
Ejemplos.....	207
BIBLIOGRAFÍA.....	209
Fundamentos teóricos.....	209
Artículos referenciados.....	209
Libros referenciados.....	210
Otros documentos referenciados.....	211
INDICADORES ECONÓMICO-FINANCIEROS MEIPOR.....	213
Indicadores financieros y económicos.....	213
Otros elementos e indicadores.....	215
Sostenibilidad financiera.....	217
Nivel de riesgo aceptable.....	217
REDACCIÓN DE LA ROM I.1-18.....	219

Símbolos y definiciones

SÍMBOLOS

En esta sección se agrupan los símbolos utilizados que aparecen en el *Articulado de la ROM 1.1-18* por Secciones.

◆ Sección 1

- h : profundidad representativa del tramo de la obra de abrigo
- F_c : francobordo
- H : altura de ola característica
- B : magnitud representativa de la anchura del dique
- L : longitud de ola característica
- C_i : costes de inversión
- C_0 : parámetro económico de adimensionalización. Su valor depende de la estructura económica y del grado de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra
- B/L : anchura relativa del dique
- F_c/H : altura relativa del dique
- SWL : nivel medio del mar local

◆ Sección 2

- C_0 : parámetro económico de adimensionalización
- V : vida útil de la obra de abrigo
- h/L : profundidad relativa
- L_i : longitud de onda característica del oleaje
- h : profundidad representativa del tramo de la obra de abrigo
- l/L : longitud relativa de un tramo de dique
- C_i : componente de la obra de abrigo (tramo, subsistema y/o modo de fallo)
- N_S : número de estabilidad asociado a la altura de ola característica del estado del oleaje
- d : daño medio acumulado
- dur : duración característica del estado del oleaje
- C_0 : parámetro económico de adimensionalización. Su valor depende de la estructura económica y del grado de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra
- H_T : valor del agente para el cual se alcanza el inicio de avería

- H_D : valor del agente para el cual se alcanza la destrucción
- d_0 : daño inicial
- D : daño producido por una sollicitación de duración $t = t_1 + t_2$
- d_1 : daño producido en el intervalo de tiempo t_1
- d_2 : daño producido en el intervalo de tiempo t_2
- q : modelo de acumulación de daño
- t : tiempo transcurrido desde el instante inicial
- a : parámetro del modelo de acumulación de daño de tipo potencial
- b : parámetro del modelo de acumulación de daño de tipo potencial
- c : parámetro del modelo de acumulación de daño de tipo potencial
- α : función del agente adimensional N_s
- T : periodo característico del oleaje
- $D_{n,50}$: diámetro equivalente* del material poroso
- $H_{W,rms}$: altura de ola media cuadrática en la pared del dique
- $H_{T,rms}$: altura de ola media cuadrática en el talud del dique
- $H_{i,rms}$: altura de ola media cuadrática incidente
- f_{d0} : función de densidad del daño inicial
- μ : valor medio de la función de densidad del daño inicial
- σ : desviación típica de la función de densidad del daño inicial
- d_c : valor de daño crítico
- $p_{f,dc}$: probabilidad de fallo
- $p_{f,V}$: probabilidad de fallo del modo en el tiempo V
- r : fiabilidad de la estructura
- γ : constante del modelo de acumulación de daño de tipo potencial
- F_d : función de distribución del daño acumulado en un ciclo de sollicitación
- Φ : función de distribución normal
- μ_0 : media de $(d_0 - \gamma)^{1/b}$
- σ_0^2 : varianza de $(d_0 - \gamma)^{1/b}$
- kt : media de $\int_0^t \alpha [N_s(t)] dt$
- rt : varianza de $\int_0^t \alpha [N_s(t)] dt$
- A : avería producida
- A_0 : valor inicial de la avería
- Q : valor adimensional del agente
- $R(t)$: función de fiabilidad
- t_V : periodo de tiempo medido desde un instante inicial
- $CT_{3,1}$: condiciones de trabajo excepcionales fortuitas
- $CT_{3,1,1}$: condiciones de trabajo fortuitas del medio físico
- $CT_{3,1,2}$: condiciones de trabajo fortuitas accidentales
- $CT_{3,2}$: condiciones de trabajo excepcionales previstas
- $CT_{1,3}$: condiciones de trabajo post-excepcionales operativas
- D_0 : nivel de inicio de avería
- D_f : nivel de avería para el que se declara la destrucción total
- $P_{f,V}$: probabilidad de fallo del modo en el tiempo V
- $D_{1,SR}$: diseño 1 sin reparación
- $D_{2,SR}$: diseño 2 sin reparación
- $D_{1,CR}$: diseño 1 con reparación
- $D_{2,CR}$: diseño 2 con reparación
- W : variable aleatoria tiempo de supervivencia
- f_W : función de densidad del tiempo de supervivencia
- F_W : función de distribución del tiempo de supervivencia
- t_0 : instante de referencia
- U : variable aleatoria que describe el intervalo entre fallos
- f_U : función de densidad del tiempo entre fallos
- F_U : función de distribución del tiempo entre fallos
- λ_U : tasa media de fallos por unidad de tiempo

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- μ_U : caracteriza al valor medio de U
- t_f : vida fiable, tiempo que transcurre para que la fiabilidad, de inicio, de destrucción u otro nivel de daño acumulado, decrezca hasta un nivel dado
- $h(t)$: función peligro
- T_D : tasa de disponibilidad de un componente.
- τ_F : tiempo medio entre fallos
- τ_R : tiempo medio para efectuar la reparación
- λ_{D_0} : tasa media de Poisson para el inicio de avería
- λ_{D_f} : tasa media de Poisson para la destrucción de la obra
- μ_{W,D_0} : tiempo medio de supervivencia sin que ocurra un inicio de avería desde el arranque de la obra o desde la última reparación
- μ_{W,D_f} : tiempo medio de supervivencia sin que ocurra la destrucción desde el arranque de la obra o desde la última reconstrucción
- IRP : Índice de resiliencia potencial del diseño
- d_{ij} : nivel de daño en el modo de fallo i que desencadena el inicio de avería en el modo j
- R_i : valor de la avería para el que se inicia la reparación en el modo i
- t_i : tiempo unitario de reparación del modo i
- F : fallo
- NF : no fallo
- S_n : suceso n
- H : altura de ola característica
- V_0 : volumen de rebase acumulado
- F_{MT} : altura de la berma de pie
- F_c : francobordo

◆ Sección 3

- ϑ : ángulo de incidencia relativo respecto al tramo del dique
- h/L : profundidad relativa
- h : profundidad a pie de dique
- T_z : periodo medio del oleaje
- L : longitud de onda a pie de dique
- D_0 : nivel de inicio de avería
- V : vida útil de la obra de abrigo
- C_i : componente de la obra de abrigo (tramo, subsistema y/o modo de fallo)
- F_{MT}/h : altura de berma relativa
- F_{MT} : altura de la berma de pie
- SWL : nivel medio del agua
- B_b : anchura de la berma de pie
- F_c : francobordo
- B : anchura del dique
- d : altura de la columna de agua sobre la berma de pie
- H : altura de ola incidente
- h_b : altura de la cimentación del dique
- d_s : anchura del talud del dique en S
- h_s : altura del talud del dique en S

◆ Sección 4

- Z : coeficiente de seguridad
- Z_c : valor mínimo del coeficiente de seguridad (dependiente del modo de fallo)
- S : margen de seguridad
- S_0 : margen de seguridad crítico (dependiente del modo de fallo)
- X_1 : términos favorables dependientes de la avería que se considere
- X_2 : términos desfavorables dependientes de la avería que se considere

- x : ubicación espacial de la avería
- t : tiempo al que sucede la avería
- d/h : sumergencia relativa
- d : profundidad de una placa semisumergida
- d/h : sumergencia relativa
- η : superficie libre
- p : presiones sobre el dique
- F : fuerzas sobre el dique
- γ : parámetro de forma de pico del espectro JONSWAP
- H_{m0} : altura de ola de momento de orden cero
- ρ_w : densidad del agua
- g : aceleración de la gravedad
- r : resistencia a cortante de la placa (término favorable)
- F_c : fuerza máxima hacia tierra o mar (término desfavorable)
- B : anchura de la estructura (distancia entre la placa sumergida y la pared vertical)
- θ : ángulo de incidencia relativo respecto al tramo del dique
- A_0 : amplitud de la onda incidente
- h : profundidad a pie de dique
- η_1 : superficie libre en la región exterior
- η_2 : superficie libre en la región interior
- F_1 : fuerzas sobre la placa semisumergida por la región exterior
- F_2 : fuerzas sobre la placa semisumergida por la región interior
- F_{total} : fuerza total actuante sobre la placa semisumergida
- H_1 : altura de ola en la región exterior
- H_2 : altura de ola en la región interior
- T_1 : periodo del oleaje en la región exterior
- T_2 : periodo del oleaje en la región interior
- F_{tierra} : fuerza total actuante sobre la placa semisumergida hacia tierra
- F_{mar} : fuerza total actuante sobre la placa semisumergida hacia mar
- H : altura de ola
- F : fuerza sobre la placa semisumergida
- S_{min} : valor mínimo del margen de seguridad

◆ Sección 5

- C_T : costes totales acumulados del dique de abrigo
- τ : nivel jerárquico correspondiente a los tramos de la obra de abrigo
- s : nivel jerárquico correspondiente a los subsistemas de la obra de abrigo
- m : nivel jerárquico correspondiente a los modos de fallo de la obra de abrigo
- \bar{x} : vector que incluye los factores de proyecto de la obra de abrigo
- C_{CON} : descriptor de costes totales de construcción de la obra de abrigo
- C_{MAN} : descriptor de costes totales de conservación de la obra de abrigo
- C_{REP} : descriptor de costes totales de reparación de la obra de abrigo
- C_{DES} : descriptor de costes totales de desmantelamiento de la obra de abrigo
- C_{CA} : descriptor de costes totales de cese de actividad de la obra de abrigo
- C_{EXT} : descriptor de costes totales relacionados con las externalidades de la obra de abrigo
- c_{CON} : costes unitarios de construcción de la obra de abrigo
- c_{MAN} : costes unitarios de conservación de la obra de abrigo
- c_{REP} : costes unitarios de reparación de la obra de abrigo
- c_{DES} : costes unitarios de desmantelamiento de la obra de abrigo
- c_{CA} : costes unitarios de cese de actividad de la obra de abrigo
- Ψ_{CON} : estrategia de construcción de la obra de abrigo
- Ψ_{REP} : estrategia de reparación de la obra de abrigo
- Ψ_{DES} : estrategia de desmantelamiento de la obra de abrigo
- Ψ_{GES} : estrategia de gestión de la obra de abrigo

- t : tiempo transcurrido desde un instante de referencia
- C_T : coste total de la obra de abrigo producido durante los tiempos t_1 y t_2
- C_0 : coste inicial (relacionado con la construcción de la obra de abrigo)
- C_H : coste de reparación debido a la ocurrencia del modo de fallo o parada
- q : forma de acumulación del coste en función del modo de fallo y sus agentes predominantes
- a : parámetro del modelo de acumulación de costes de tipo potencial
- b : parámetro del modelo de acumulación de costes de tipo potencial
- c : parámetro del modelo de acumulación de costes de tipo potencial
- C_I : costes de inversión
- C_0 : parámetro económico de adimensionalización. Su valor depende de la estructura económica y del grado de desarrollo económico del país donde se vaya a construir la obra
- CT_1 : condiciones de trabajo operativas normales
- CT_2 : condiciones de trabajo operativas extremas
- $CT_{3,1}$: condiciones de trabajo excepcionales fortuitas
- $CT_{1,3}$: condiciones de trabajo post-excepcionales operativas
- $CT_{2,3}$: condiciones de trabajo post-excepcionales extremas
- N_S : número de estabilidad asociado a la altura de ola característica del estado del oleaje
- d_0 : daño inicial

◆ Anejo Indicadores Económico-Financieros MEIPOR

- $VANF(I)$: valor actual neto financiero del proyecto
- $(\Delta FC_{proy})_t$: flujos de caja libre diferenciales del proyecto para el agente considerado en el año t entre las situaciones con y sin proyecto.
- $i_{financ.proy}$: Tasa Financiera de Descuento del proyecto considerada
- t : año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en año 0)
- T : número de años de horizonte temporal del proyecto
- $TIRF(I)$: Tasa Interna de Rentabilidad Financiera del proyecto
- $Payback$: período de recuperación de la inversión
- $(FC_{netos})_t$: flujos de caja netos para un agente en el año t entre las situaciones con y sin proyecto
- t' : año de cálculo dentro del horizonte del Proyecto de Inversión
- $(Cobertura_{servicio.deuda})_t$: ratio de cobertura del servicio de la deuda para el agente en el año t
- $(\Delta I_{op})_t$: ingresos de operación en el año t entre la situación con y sin proyecto
- $(\Delta C_{imp})_t$: pagos de impuestos en el año t entre la situación con y sin proyecto
- $(\Delta C_{op})_t$: costes de operación en el año t entre la situación con y sin proyecto
- $(\Delta C_{financ})_t$: costes de financiación (devolución principal e intereses) en el año t entre la situación con y sin proyecto
- $VANE(I)$: Valor Anual Neto Económico del proyecto
- $(\Delta E_{total})_t$: variación del excedente total del año t
- i_{social} : tasa "social" de descuento del proyecto
- $TIRE(I)$: Tasa Interna de Rentabilidad Económica del proyecto

ACRÓNIMOS

En esta sección se agrupan los acrónimos más utilizados que aparecen en el Articulado de la ROM 1.1-18.

- A: arranque
- AI: avería Iribarren
- AP: alineación principal
- AS: alineación secundaria
- CT: cimentación y terreno
- CT_i , con $i = 1, 2$ ó 3 : condiciones de trabajo
- d: daño
- D: destrucción

- DA: desencadenamiento de avería
- DPMT: dominio público marítimo-terrestre
- DPPE: dominio público portuario estatal
- ELS: estado límite de servicio.
- ELU: estado límite último
- F: fallo
- IA: inicio de avería
- IR: índice de resiliencia
- IRE: índice de repercusión económica
- IREO: índice de repercusión económica operativo
- ISA: índice de repercusión social y ambiental
- ISAO: índice de repercusión social y ambiental operativo
- IS: interior de la sección
- M: morro
- MEIPOR: método de evaluación de inversiones portuarias
- MF: modo de fallo
- PD: punto de desencadenamiento
- PE: perímetro exterior
- PEB: perímetro exterior barlomar
- PES: perímetro exterior sotamar
- PI: puntos intermedios
- R: ruina del tramo
- ROM: recomendaciones para obras marítimas
- SA: sin avería
- SE: superestructura
- SS: subsistema
- T: transición
- TS: tiempo de supervivencia
- VANE: valor actual neto económico
- VANF: valor actual neto financiero

DEFINICIONES

En esta sección se agrupan las definiciones de los conceptos y términos más utilizados para el *Articulado de la ROM 1.1-18*.

- ◆ **Alineación principal:** Tramo de un dique de abrigo que permite el abrigo y el control de las oscilaciones del mar.
- ◆ **Alineaciones secundarias:** Aquellas que sirven para unir los diferentes tramos del dique.
- ◆ **Alternativas:** opciones de proyecto posibles.
- ◆ **Altura de ola:** Distancia vertical entre una cresta y el seno precedente.
- ◆ **Altura de ola máxima:** Altura de la mayor ola dada en un registro o en un tren de ondas en un determinado estado de mar.
- ◆ **Altura de ola significativa:** Media aritmética de las alturas del tercio de olas más altas de un registro de oleaje.
- ◆ **Amplitud:** La amplitud de un movimiento oscilatorio, ondulatorio o señal electromagnética es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi periódicamente en el tiempo con respecto a un nivel de referencia.

- ◆ **Año meteorológico:** Comienza el 1 de octubre y finaliza el 30 de septiembre del año siguiente, se puede considerar como el pulso meteorológico del planeta.
- ◆ **Aptitud para el servicio / funcionalidad:** Valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la fase o subfase de proyecto considerada frente a los modos de fallo adscritos a los estados límite de servicio.
- ◆ **Árbol de decisión:** Es un diagrama de decisiones secuenciales que muestra los posibles resultados. Esto ayuda a la toma de decisiones y a determinar cuáles son las opciones de las distintas decisiones y los resultados posibles.
- ◆ **Área abrigada:** Es una superficie de agua y tierra a resguardo de las acciones de las dinámicas atmosférica y marina.
- ◆ **Área litoral:** Facilita el uso y la explotación ordenada y sostenible del entorno litoral, pudiendo incluir, entre otros, la corrección, protección y defensa del borde litoral, la generación, conservación y regeneración de playas y zonas de baño, y el intercambio de los flujos transversales tierra-mar de todo tipo de sustancias.
- ◆ **Área portuaria:** Facilita las operaciones portuarias y logísticas relacionadas con el transporte marítimo y su interconexión con otros modos de transporte y con la gestión integral del barco, incluyendo las operaciones relacionadas con la actividad náutico-deportiva, industrial y militar.
- ◆ **Arranque del dique:** Tramo de un dique de abrigo que define la unión del dique con tierra u otro dique.
- ◆ **Asomeramiento:** Cuando un tren de ondas se propaga hacia profundidades menores, además de disminuir su celeridad de onda y, en consecuencia, su longitud de onda, varía su amplitud a raíz de la disminución de la velocidad de propagación de la energía. Estas dos modificaciones se traducen en un cambio del valor del peralte H/L .
- ◆ **Avería:** Daño, rotura o fallo que impide o perjudica el funcionamiento del dique de abrigo.
- ◆ **Banqueta:** Materiales de relleno de granulometría gruesa y alta permeabilidad, que facilita el reparto de cargas y la liberación de presiones intersticiales ofreciendo una buena resistencia al esfuerzo cortante y una baja deformabilidad.
- ◆ **Barlomar:** Lado de la estructura del que procede el oleaje.
- ◆ **Batimetría:** Variabilidad espacial de niveles (cotas) del fondo del mar.
- ◆ **Berma de coronación:** Área casi horizontal que se construye en ambas caras de un dique en talud para reducir el ascenso del oleaje y el rebase y para dar acceso para el mantenimiento del dique.
- ◆ **Berma de pie:** Elemento protector compuesto generalmente por material granular situado en el pie del dique de abrigo. Sirve de apoyo a los mantos protectores.
- ◆ **Bocana:** Boca de entrada y salida a un puerto o una dársena.
- ◆ **Buque:** Barco con cubierta que por su tamaño, solidez y potencia es apropiado para el transporte de mercancías y pasajeros.
- ◆ **Calado:** Profundidad de agua necesaria para que el barco no toque fondo, teniendo que disponer de un resguardo bajo quilla como medida de seguridad.
- ◆ **Capacidad portante:** En cimentaciones se denomina capacidad portante a la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de

contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzca un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

- ◆ **Carácter general del tramo:** Es un indicador de la importancia de dicho tramo, medida a través de las repercusiones económicas, sociales y ambientales generadas en caso de su destrucción o pérdida irreversible de su funcionalidad. Es, por tanto, indicativo de la magnitud de las consecuencias derivadas del eventual fallo de la obra de abrigo una vez haya entrado en servicio.
- ◆ **Carácter operativo:** Es un indicador de las repercusiones económicas, sociales y ambientales que se podrían producir cuando no se alcancen o se reduzcan las condiciones de operatividad en el área abrigada o protegida por el dique de abrigo o en sus accesos. Es, por tanto, indicativo de la magnitud de las consecuencias ocasionadas por las paradas operativas en la fase de servicio.
- ◆ **Ciclo de calma:** Tiempo en el que el valor de las variables que definen el estado permanece de forma continua por debajo de un valor umbral de calma.
- ◆ **Ciclo de operatividad:** Es la secuencia de estados meteorológicos en los que el valor de algunos descriptores permanece de forma continua por debajo de un valor umbral de operatividad.
- ◆ **Ciclo de solicitación:** Es una secuencia de estados meteorológicos que comienza desde el instante en el que el valor de algunos descriptores estadístico superan un cierto valor umbral hasta que, transcurrido cierto tiempo, es inferior a él. Los ciclos de solicitación del oleaje se conocen también con el nombre de temporales.
- ◆ **Ciclo de uso y explotación:** Es la secuencia de estados meteorológicos en los que la probabilidad de que ocurra un modo de parada adscrito a los estados límite operativos no es significativa bien en el cómputo de la probabilidad conjunta de parada operativa en la vida útil, bien en el número de paradas operativas, bien en la duración de la parada operativa.
- ◆ **Cimentación:** Parte del dique en contacto con el suelo y por tanto la vía de transmisión de los esfuerzos al terreno.
- ◆ **Circulación general:** La radiación solar provoca un calentamiento neto de los trópicos y un enfriamiento neto de los polos. La circulación global se establece como mecanismo compensatorio de esta diferencia de temperatura.
- ◆ **Clima marítimo:** Caracterización de la dinámica marina en períodos largos de tiempo o descripción estadística de la variación en el dominio del tiempo de los estados meteorológicos en un emplazamiento dado. Puede considerarse definido a partir de la estadística unidimensional y bidimensional de los parámetros geométrico-estadísticos y espectrales representativos del estado meteorológico en la zona considerada.
- ◆ **Coficiente de seguridad:** Relación entre la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real al que se ve sometido.
- ◆ **Condiciones de trabajo excepcionales:** Conjunto de estados de proyecto asociados a algunos valores de los factores de proyecto que tienen: una probabilidad de ser superados muy pequeña y mucho menor que la probabilidad de presentación de los valores de los factores predominantes que definen las condiciones de trabajo extremas, su presentación es inesperada y accidental, u ocurren por razones previstas de uso y explotación. Pueden ser fortuitas o previstas, y las fortuitas pueden ser fortuitas del medio físico o fortuitas accidentales.
- ◆ **Condiciones de trabajo extremas:** Son aquellas condiciones definidas por los valores máximos previsible de la variable en un intervalo de tiempo.
- ◆ **Condiciones de trabajo normales:** Estado en el que una instalación funciona sin limitaciones, no viéndose afectada su explotación u operatividad por las condiciones medioambientales.

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

- ◆ **Contradique:** Dique no principal cuya función es proteger de los oleajes menos severos y delimitar la bocana y el área portuaria.
- ◆ **Corriente:** Flujo de aire debido al viento y flujo de agua debido a diversos factores, tales como la marea, el oleaje, la descarga producida por un curso fluvial, etcétera.
- ◆ **Corriente longitudinal:** Corrientes litorales en la zona de rompiente cuya dirección predominante es paralela a la línea costa, habitualmente generadas por rotura de oleaje en forma oblicua a la costa.
- ◆ **Corriente de marea:** Circulación de agua producida por la marea astronómica. Puede dividirse en corriente vaciante o entrante, dependiendo del tramo del ciclo de marea considerado.
- ◆ **Coste anual total de la obra:** Suma del coste esperado de los daños anuales por cada uno de los modos principales y el coste anual equivalente de la inversión.
- ◆ **Coste total de la inversión:** Suma del coste esperado de los daños anuales acumulados producidos por cada uno de los modos principales y el coste de la inversión.
- ◆ **Coste total de conservación y explotación:** Incluye, con sus calendarios correspondientes, todos los necesarios para que el tramo proporcione las condiciones adecuadas de uso y explotación del área portuaria y, en su caso, de sus instalaciones, manteniendo los requisitos de fiabilidad, funcionalidad y operatividad.
- ◆ **Covarianza:** La covarianza de dos variables aleatorias U y V , $Cov[U, V]$, es el valor esperado de los productos de sus desviaciones con respecto a sus medias.
- ◆ **Cuerpo central del dique:** Es el principal elemento resistente frente a la acción del oleaje, provocando su transformación mediante procesos como la rotura o la reflexión.
- ◆ **Curvas de estado:** Representación de la evolución temporal de alguno de los descriptores de estado en un punto del mar.
- ◆ **Curvas de estado del oleaje:** Curva que define los sucesivos estados de oleaje en forma continua en función del tiempo. Esta curva representa la evolución de un parámetro estadístico determinado, representativo del estado de oleaje, por ejemplo, la altura de ola significativa.
- ◆ **Deformación:** La deformación es el cambio en el tamaño o forma de un cuerpo debido a esfuerzos internos producidos por una o más fuerzas aplicadas sobre el mismo.
- ◆ **Descriptores de estado:** Representan la variabilidad estadística o frecuencial del estado.
- ◆ **Desmantelamiento:** Levantamiento de una estructura y restauración, en su caso, del territorio a sus condiciones originales.
- ◆ **Dique berma o dique en S:** Dique de materiales sueltos cuya principal característica es el diseño del manto principal exterior con una berma, situada ligeramente por encima del nivel medio, y con un peso de las piezas inferior al necesario para asegurar su estabilidad estática. Este tipo de diques, cuando se ven sometidos a la sollicitación de cálculo, modifican el perfil del manto exterior hasta que se alcanza una situación de equilibrio.
- ◆ **Dique de abrigo:** Estructura de protección construida para reducir la acción del oleaje, por medio de una combinación de reflexión y disipación de la energía del oleaje incidente.
- ◆ **Dique mixto:** Obra marítima construida con una base granular sobre la que se apoya una estructura reflejante. El comportamiento del dique como reflejante o rompeolas depende de la cota de cimentación de la estructura y de las características del oleaje incidente.

- ◆ **Dique en talud con y sin espaldón:** También se denomina dique rompeolas o de escollera. Se caracteriza porque el paramento frontal o de barlomar está construido en talud y con materiales granulares. Disipa la energía del oleaje mediante rotura, fricción con el material granular y por transmisión del oleaje hacia la parte abrigada.
- ◆ **Dique vertical:** Tipología de dique de abrigo caracterizada por tener el paramento vertical, donde generalmente la parte central y la superestructura están formados por un único elemento estructural. El dique esencialmente actúa como reflector del flujo de energía incidente. También puede estar formado por una estructura vertical permeable.
- ◆ **Dique sumergido:** La geometría de la sección de estos diques es muy similar a la del dique emergido sin espaldón, pero su cota de coronación se encuentra por debajo del nivel medio del mar.
- ◆ **Dirección principal de propagación:** Es aquella en la que se produce el máximo flujo de energía.
- ◆ **Dirección de propagación:** Dirección en la que se propaga una onda.
- ◆ **Distribución conjunta:** Es la distribución de la probabilidad de que dos eventos X e Y ocurran de forma simultánea. En el caso de solo dos variables aleatorias se denomina una distribución bivariada, pero el concepto se generaliza a cualquier número de eventos o variables aleatorias.
- ◆ **Distribución de extremos:** Distribución que determina la probabilidad que un valor extremo cualquiera X sea menor que otro fijado x .
- ◆ **Distribución temporal:** Serie o registro continuo de datos cada cierto intervalo de tiempo de una variable.
- ◆ **Dominio espacial:** Superficie en la que se desarrolla la actividad, sea física o de carácter matemático. En el caso del movimiento oscilatorio se define en función de la longitud de onda, L , y de la profundidad relativa, $\frac{h}{L}$, siendo h la profundidad de agua.
- ◆ **Dominio temporal:** Es el intervalo de tiempo en el que se desarrolla la actividad sea física o de carácter matemático. En el caso del movimiento oscilatorio se define en función del periodo de la ola T y del número de olas.
- ◆ **Duración de la excedencia:** Tiempo que en un intervalo de tiempo, año meteorológico o vida útil, el descriptor de estado se mantiene por encima del valor seleccionado.
- ◆ **Duración del estado:** Cuantifica el tiempo que debe transcurrir para que se produzca un cambio significativo en la manifestación del proceso y, en consecuencia, el tiempo durante el cual se admite que se cumplen las hipótesis sobre las que se sustenta.
- ◆ **Duración máxima de una parada:** Tiempo máximo esperado de una parada operativa.
- ◆ **Ecuación de verificación:** Relación funcional entre factores de proyecto que describe la ocurrencia de cada uno de los modos de fallo. Esta ecuación se puede formular en diversos formatos: coeficiente de seguridad global, margen de seguridad, etc.
- ◆ **Energía incidente o flujo de energía:** Es la cantidad de energía que pasa por una superficie del volumen de control en la unidad de tiempo.
- ◆ **Entrada parcial en servicio:** En los casos en los que durante la fase de construcción, el dique o tramo de dique entre transitoriamente en servicio, la probabilidad de fallo admisible durante esta fase transitoria será la que se especifique en el proyecto, habiendo considerado las consecuencias sociales y ambientales del fallo en esta situación e incluyendo las condiciones relacionadas con la construcción.
- ◆ **Erosión:** Modificación de la geometría del manto o lecho por pérdida de los elementos que lo conforman.

- ◆ **Espacio muestral:** Conjunto de todos los valores posibles de la población.
- ◆ **Espaldón o coronación:** Parte más elevada de una obra marítima. Generalmente se le denomina espaldón a una estructura monolítica de hormigón situada sobre la coronación del dique y que permite el acceso sobre el dique y reducir parcialmente el rebase y el volumen del dique.
- ◆ **Estadístico:** Cualquier función de los valores observados o muestrales que sea cuantificable y no contenga ningún parámetro desconocido se denomina estadístico.
- ◆ **Estado de oleaje:** Intervalo de tiempo en el que puede admitirse que cualquier manifestación del oleaje es estacionaria en sentido estadístico. Se puede caracterizar por una altura y un periodo representativos (p. ej. la altura de ola significativa y un periodo medio o pico).
- ◆ **Estado Límite de Servicio:** Estado de proyecto en el cual, la obra en su conjunto, o alguno de sus tramos o elementos, queda fuera de uso o servicio por incumplimiento de los requisitos de servicio especificados en el proyecto. Estado que produce 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 ellos se consideran todos aquellos modos de fallo que reducen o condicionan el uso y explotación de la obra y que pueden significar una reducción de la vida útil o de la probabilidad de supervivencia de la obra debidos a la degradación de las propiedades de los materiales de construcción o del terreno, a deformaciones o vibraciones excesivas en la estructura para el uso y explotación de la obra o a alteraciones geométricas acumulativas.
- ◆ **Estado Límite Último:** Estado de proyecto en el cual, la obra en su conjunto, o alguno de sus tramos o elementos, queda fuera de uso o servicio por incumplimiento de los requisitos de seguridad especificados en el proyecto. Estado que produce la destrucción, por rotura o colapso estructural de la obra o de una parte de ella. En ellos se consideran todos aquellos modos de fallo debidos a la pérdida de equilibrio de la estructura o parte de ella como sólido rígido, a las deformaciones plásticas excesivas, rotura o pérdida de la estabilidad de la estructura o parte de ella o a la acumulación de deformaciones, fisuración progresiva o fatiga bajo cargas repetidas.
- ◆ **Estado Límite Operativo:** Es aquel en el que se reduce o se suspende temporalmente la explotación portuaria por causas externas a la obra, sin que haya daño estructural en ella.
- ◆ **Estado meteorológico:** Describe y caracteriza la manifestación simultánea de los agentes atmosféricos (velocidad y dirección de viento, precipitación, niebla, etc.) y marinos (oleaje, marea meteorológica y astronómica, otras oscilaciones de largo periodo y corrientes).
- ◆ **Estado umbral de seguridad:** Describe y caracteriza el comienzo y el final de un temporal o ciclo de solitización; suele estar relacionado con las condiciones de trabajo extremas, es decir, con la presentación de los estados meteorológicos más severos.
- ◆ **Estado umbral de uso y explotación:** Describe y caracteriza el comienzo y el final de un intervalo de calmas, o de ciclo de operatividad, en los que la obra y sus instalaciones están operativas y, en consecuencia, es posible el uso y la explotación; suele estar asociado a las condiciones de trabajo operativas normales.
- ◆ **Estimación:** Es el valor que el estimador proporciona al aplicarlo a un caso concreto.
- ◆ **Fase de conservación y reparación:** Fase de proyecto que incluye los intervalos de tiempo en los que de forma periódica o circunstancialmente se realizan trabajos de conservación y de reparación y que pueden conllevar, o no, una reducción de la seguridad, aptitud para el servicio o del uso y explotación de la obra, en alguno de sus tramos, o del área portuaria.

- ◆ **Fase de construcción:** Fase de proyecto que se extiende desde el inicio de la construcción hasta la puesta en servicio de la obra, entendiéndose por tal el instante en el cual la obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida.
- ◆ **Fase de proyecto:** Secuencia temporal de estados de proyecto durante los cuales el tramo de obra mantiene una misma actividad principal, aunque pueda tener otras secundarias. Se podrán considerar las siguientes fases de proyecto: estudios y proyecto de construcción, construcción, servicio, conservación, reparación y desmantelamiento. La duración de la fase de servicio es la vida útil del tramo.
- ◆ **Fase de remodelación, transformación y desmantelamiento:** Fase de proyecto que se inicia en el instante en el que el tramo de obra está en condiciones de cumplir plenamente la función principal para la que ha sido concebida y finaliza con su remodelación, transformación o desmantelamiento. Puede interrumpirse parcial o totalmente durante la fase de conservación y reparación.
- ◆ **Fase de servicio o vida útil:** Fase de proyecto que incluyen los intervalos de tiempo en los que, de forma continua o discontinua, se realizan actividades de remodelación/reconstrucción, transformación o desmantelamiento y restauración del emplazamiento.
- ◆ **Fiabilidad:** Valor complementario de la probabilidad conjunta de fallo en la fase o subfase de proyecto considerada frente a los modos de fallo adscritos a los estados límite últimos.
- ◆ **Formulación determinista:** Los términos de la ecuación toman valores nominales, independientemente de su probabilidad de excedencia.
- ◆ **Formulación probabilista:** Los valores de los términos de la ecuación se determinan a partir de sus respectivos modelos de probabilidad en la fase analizada, calculados en general a partir de los modelos de probabilidad de los parámetros y agentes.
- ◆ **Frecuencia:** Número de veces que se produce un suceso determinado. Es igual a la inversa del periodo, $f = \frac{1}{T}$.
- ◆ **Función condicionada:** A diferencia de las marginales, la función de densidad y distribución de una de las variables condicionada a la ocurrencia de un valor o un rango de valores de la otra se conoce con el nombre de función condicionada.
- ◆ **Función de densidad:** La función de densidad de probabilidad de una variable aleatoria, X , continua, $f(x)$, mide la intensidad o tasa de probabilidad del valor x .
- ◆ **Función de densidad condicionada:** La función de densidad condicionada de una variable aleatoria X dado un valor de la variable aleatoria Y mide la tasa de probabilidad de X en la subpoblación que cumple la condición de presentar el valor Y dado.
- ◆ **Función de densidad conjunta:** La función de densidad de probabilidad conjunta de dos variables aleatorias, X e Y , continuas, $f(x, y)$, mide la tasa de probabilidad de la intersección de eventos de X e Y , esto es, de los eventos X e Y ocurriendo de forma simultánea.
- ◆ **Función de densidad marginal:** La función de densidad de probabilidad marginal mide la tasa probabilidad de la variable X en la población total, al margen de la otra variable.
- ◆ **Función de distribución:** La función de distribución de probabilidad de X o función de distribución acumulada, es una función, $F(x)$, que asigna a cada suceso su probabilidad de no superación.
- ◆ **Función peligro:** Función que describe la probabilidad de que se produzca el fallo de un sistema en un intervalo, $t + \Delta t$, condicionado a que no se ha producido en los instantes anteriores.

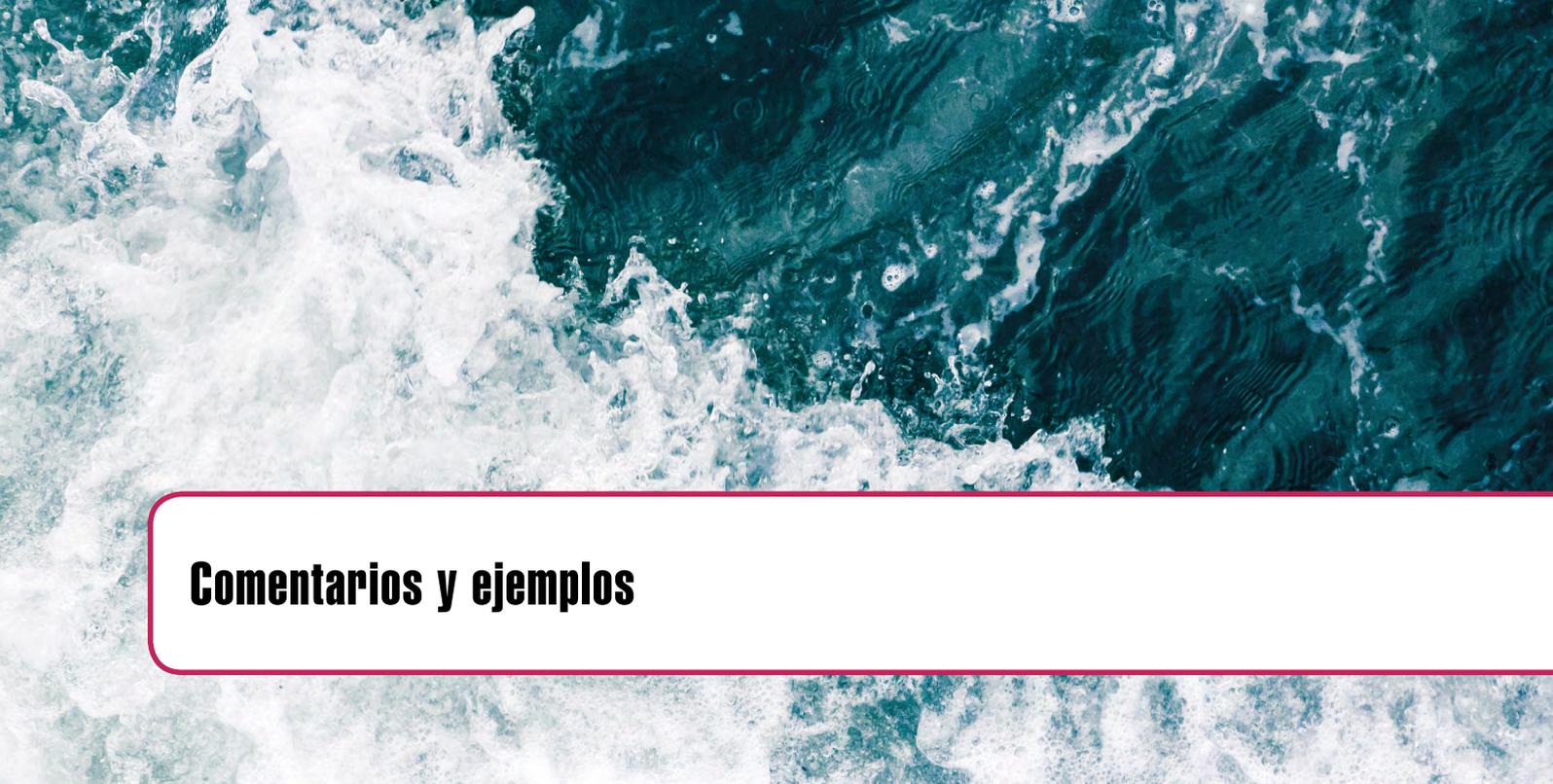
- ◆ **Funciones marginales:** Son las funciones de densidad y de distribución de una de las variables, independientemente de los valores de la otra.
- ◆ **Funciones de supervivencia:** Función que describe la probabilidad de superación de un suceso.
- ◆ **Grupo de olas:** es la combinación de dos o más olas que se reorganizan con características similares y misma dirección de propagación.
- ◆ **Histograma:** En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.
- ◆ **Hormigón en masa:** Hormigón que no contiene armadura interior.
- ◆ **Hormigón armado:** Hormigón reforzado con barras o mallas de acero.
- ◆ **Incidencia oblicua:** Se dice de los trenes de onda que arriban formando un ángulo con una alineación preestablecida, en general, un dique o la línea de costa.
- ◆ **Incidencia normal:** Se dice de los trenes de onda que arriban perpendicular a una alineación preestablecida, en general, un dique o la línea de costa.
- ◆ **Inicio de avería:** Estado de la obra para el que se considera que comienza la avería en alguna parte de la misma por alguno de los modos principales.
- ◆ **Índice de repercusión económica:** Valora cuantitativamente las repercusiones económicas por reconstrucción de la obra y por cese o afección de las actividades directamente relacionadas con ella, previsibles, en el caso de producirse la destrucción o la pérdida de operatividad total de la misma.
- ◆ **Índice de repercusión económica operativo:** Valora cuantitativamente los costes ocasionados por la parada operativa del tramo de obra.
- ◆ **Índice de repercusión social y ambiental:** Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse la destrucción o pérdida de operatividad total de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada, considerando que el fallo se produce una vez consolidadas las actividades económicas directamente relacionadas con la obra.
- ◆ **Índice de repercusión social y ambiental operativo:** Estima de manera cualitativa el impacto social y ambiental esperable en el caso de producirse un modo de parada operativa de la obra marítima, valorando la posibilidad y alcance de: pérdida de vidas humanas, daños en el medio ambiente y en el patrimonio histórico-artístico y alarma social generada.
- ◆ **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 o cargas fluctuantes.
- ◆ **Línea de costa:** Línea en la superficie de la Tierra que define el límite entre mar y tierra firme.
- ◆ **Litoral:** Incluye dos zonas, la plataforma continental interior y la zona de rompientes, y es la zona en la que habitualmente se ubican las áreas portuarias y litorales y, en consecuencia, en la que se construyen las obras marítimas y portuarias.

- ◆ **Longitud de onda:** Distancia horizontal que existe entre dos puntos de la misma fase de un tren de ondas, por ejemplo dos crestas o dos senos contiguos.
- ◆ **Mantos de protección:** Las diferentes capas de piezas que forman un dique en talud.
- ◆ **Manto principal:** Es el más externo de los mantos de un dique en talud y constituye el elemento resistente del dique, sobre el que se disipa la energía del oleaje.
- ◆ **Mantos secundarios:** Son los mantos interiores de un dique en talud, que sirven de apoyo al manto principal y de transición hasta el núcleo.
- ◆ **Maremoto:** Onda larga de periodo comprendido entre varios minutos y una hora y altura de ola de hasta las decenas de metros, generada bien por el movimiento vertical del fondo marino asociado a un terremoto submarino, bien por la caída de grandes deslizamientos de tierra o erupciones volcánicas o por otras causas.
- ◆ **Margen de seguridad:** $S = x_1 - x_2$, siendo x_1 y x_2 expresiones de las acciones que se oponen o favorecen la ocurrencia del modo de fallo.
- ◆ **Mecanismo:** Forma en que se produce el fallo o la parada.
- ◆ **Métodos de los estados límite:** Cálculos que se realizan para verificar que en cada uno de los modos de fallo o parada se cumplen los requisitos de proyecto respecto a la fiabilidad, funcionalidad y operatividad en todas las fases y estados de proyecto, adscritos a unos estados límite de seguridad, servicio o uso y explotación.
- ◆ **Métodos de Nivel I:** Son métodos de verificación de los modos de fallo en los que los factores de proyecto y los valores de los términos se determinan, por lo general, con criterios deterministas. Incluyen los métodos del coeficiente de seguridad global y de los coeficientes de seguridad parciales.
- ◆ **Métodos de Nivel II:** Métodos de verificación en los que se define la ecuación de verificación en función de los momentos estadísticos de primer orden y, mediante transformaciones funcionales, se expresa en términos de variables gaussianas reducidas e independientes. Se relaciona la probabilidad de fallo con la mínima distancia entre el origen de coordenadas y la superficie de fallo ($G=0$), que es una ecuación de verificación en formato de margen de seguridad. Se deben conocer, en el intervalo de tiempo, las funciones de distribución y covarianza de los factores de proyecto.
- ◆ **Métodos de Nivel III:** Son métodos de verificación que obtienen la solución de la ecuación de verificación integrando una función multidimensional en el dominio del fallo. Esta integración es una tarea compleja, y por lo general se pueden obtener la probabilidad de fallo y los valores de los factores de proyecto mediante técnicas de simulación numérica (p. ej. Monte Carlo). Se deben conocer, en el intervalo de tiempo, las funciones de distribución conjunta de los factores de proyecto que intervienen en la ecuación de verificación.
- ◆ **Modo de Fallo:** Forma o mecanismo, geométrico, físico, mecánico, químico o biológico, por el cual la obra o alguno de sus elementos, queda fuera de servicio por causas estructurales. Se adscriben a los estados límites últimos o de servicio para su comprobación.
- ◆ **Modos mutuamente excluyentes:** Aquellos cuya ocurrencia de uno excluye la ocurrencia de los otros, y aquellos que no lo son.
- ◆ **Modos no principales:** Un modo tendrá la consideración de no principal cuando con pequeños incrementos de los costes totales de la obra se puede mejorar significativamente la fiabilidad, funcionalidad u operatividad del tramo frente a él.
- ◆ **Modos principales:** Los modos de fallo y parada para los que mejorar la fiabilidad, funcionalidad u operatividad del tramo de obra sea difícil, o realizable únicamente mediante aumentos muy importantes de los costes de la obra, se denominan modos principales.

- ◆ **Morro:** Extremo de un dique; en general es la parte más expuesta a la dinámica marina.
- ◆ **Muelle:** Obra construida en la orilla del mar o de un río navegable que sirve para facilitar la carga y descarga de los buques y otro tipo de operaciones.
- ◆ **Muestra:** En estadística, parte de la población.
- ◆ **Núcleo:** Constituye la parte central del dique y zona de apoyo de los mantos protectores. No está sometido a la acción directa de las olas y debe impedir que la agitación exterior se transmita al interior del puerto.
- ◆ **Oleaje:** Alteraciones de la superficie del mar producidas por la actuación continua del viento sobre una superficie (fetch) durante un cierto periodo de tiempo. Este fenómeno produce un conjunto de ondas aleatorias, de forma más o menos irregular, con diferentes direcciones de propagación y con periodos de entre 1 y 30 segundos.
- ◆ **Onda característica:** Es una oscilación que se propaga de mar abierto hacia la costa y cuyas variables estadísticas son características de un estado de mar.
- ◆ **Operatividad:** Valor complementario de la probabilidad de parada en la fase o subfase de proyecto considerada frente a los modos de parada adscritos a los estados límite de parada operativa.
- ◆ **Periodo de oleaje:** Intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos ascendentes (o descendentes) consecutivos por el nivel medio.
- ◆ **Periodo medio:** Media aritmética de los periodos de oleaje.
- ◆ **Periodo pico:** Periodo correspondiente al pico de energía de un espectro de oleaje.
- ◆ **Pieza del manto principal:** Piedra grande de cantera o bloque prefabricado de hormigón con forma especial que se utiliza como protección principal contra la acción del oleaje en el manto principal de un dique en talud.
- ◆ **Probabilidad de ocurrencia del modo de fallo / parada en el intervalo de tiempo:** Es el producto de la peligrosidad por la vulnerabilidad.
- ◆ **Propagación del oleaje:** Es el movimiento del oleaje en el espacio. Durante la propagación, el oleaje sufre una serie de procesos de transformación por medio de los cuales cambia la altura, el periodo, la dirección y el espectro del oleaje. Los procesos de propagación del oleaje más utilizados en la evaluación de esta transformación son: el asomeramiento, la refracción, la difracción, la reflexión, la transmisión y la rotura del oleaje.
- ◆ **Proyecto:** En el ámbito de aplicación de los documentos ROM, se denomina proyecto al conjunto de actividades que comprenden el estudio y redacción del proyecto, la construcción, la explotación, la conservación, la reparación en su caso y el desmantelamiento de una obra marítima.
- ◆ **Radiación:** Propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.
- ◆ **Rebase:** Parte del agua que remonta la coronación de un dique o muro como consecuencia del oleaje y que no vuelve directamente al mar.
- ◆ **Refracción:** Cambio de dirección y altura de ola que experimenta una onda al pasar de una profundidad a otra o al incidir oblicuamente en una corriente.

- ◆ **Régimen:** En estadística, es la función de distribución de una o varias variables de estado en un determinado intervalo de tiempo. En hidrodinámica, hace referencia a unas condiciones concretas del flujo, laminar o turbulento, o de la oscilación, Stokes o Boussinesq.
- ◆ **Régimen de extremos o extremal:** Es la función de distribución del valor mayor de los picos de los ciclos de sollicitación en cada uno de los años meteorológicos.
- ◆ **Relleno:** Depósito artificial de materiales naturales procedentes de la corteza terrestre (suelos, rocas), de piezas artificiales expresamente concebidas (tetrápodos, dolos) o de materiales de desecho industrial o urbano (basuras, escorias).
- ◆ **Relleno granular:** Relleno realizado con gravas y/o arenas extraídas de préstamos terrestres, y escaso contenido en finos.
- ◆ **Resiliencia:** Capacidad de un sistema para soportar el daño sin llegar a la destrucción completa.
- ◆ **Riesgo:** Producto de la probabilidad de que se produzca un evento por sus consecuencias negativas.
- ◆ **Rotura de la ola:** Fenómeno de disipación de energía que se produce cuando las olas se aproximan a zonas de escasa profundidad o inestabilidad de forma (peralte excesivo).
- ◆ **Serie temporal:** Colección de observaciones o simulaciones de una variable secuenciadas en el tiempo.
- ◆ **Simulación de Monte Carlo:** Es el proceso de modelar un sistema o proceso sometido a forzamientos aleatorios y conducir experimentos con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se pueda operar el sistema utilizando el algoritmo denominado de Monte Carlo.
- ◆ **Sismo:** Temblores producidos en la corteza terrestre como consecuencia de la liberación repentina de energía en el interior de la Tierra. Esta energía se transmite a la superficie en forma de ondas sísmicas que se propagan en todas las direcciones. El punto en que se origina el terremoto se llama foco o hipocentro; cuando éste se ubica bajo las aguas marinas, puede generar un maremoto o tsunami.
- ◆ **Soluciones:** aquellas alternativas que cumplen la formulación del problema (requisitos de proyecto).
- ◆ **Sotamar:** Lado de la estructura que queda abrigado del oleaje.
- ◆ **Suceso:** Un suceso puede estar formado por un elemento muestral o una combinación de elementos muestrales y representa una manifestación o un estado de proyecto. Los elementos muestrales son los sucesos más simples que permiten la descripción del conjunto de los sucesos posibles.
- ◆ **Superestructura o espaldón:** Estructura que proporciona servicio de protección frente al rebase, camino de rodadura, acceso, etcétera y en su caso, línea de atraque a sotamar del dique.
- ◆ **Tanque con generador de oleaje direccional:** Este tanque se utiliza en los laboratorios para obtener series temporales de variables instantáneas y básicas del oleaje en áreas portuarias y litorales. Los resultados dependen de la serie temporal con la que se active las paletas y de su respuesta.
- ◆ **Tiempo de parada:** Intervalo de tiempo durante el proceso constructivo del dique en el cual no se puede trabajar por daño del mismo, temporales u otras circunstancias.
- ◆ **Tiempo de reparación:** Intervalo de tiempo de reparación de los daños del dique que haya sufrido como consecuencia de los temporales.
- ◆ **Tiempo de supervivencia:** Variable aleatoria que describe el tiempo que transcurre desde un instante de referencia (habitualmente el de puesta en servicio) hasta que se produce el fallo de un sistema o componente.

- ◆ **Tiempo medio entre ciclos:** Intervalo de tiempo entre dos ciclos de sollicitación.
- ◆ **Tramo de obra:** Es un conjunto continuo de secciones (o alineación del dique) que cumplen solidariamente una función específica y relevante de los objetivos y los requisitos de explotación de la obra, están sometidas a los mismos niveles de acción de todos los agentes actuantes, en particular los predominantes, y forman parte de la misma tipología formal y estructural.
- ◆ **Transición de un dique de abrigo:** Tramo de un dique de abrigo entre dos alineaciones o dos tipologías; pueden ser partes estructuralmente débiles del dique.
- ◆ **Transmisión (de energía de las oscilaciones del mar):** Proceso por el cual una parte de la energía incidente producida al interaccionar un tren de ondas con el dique es transmitida hacia sotamar a través del dique o por encima de la sección.
- ◆ **Tren de ondas:** Es una repetición indefinida del ciclo de la onda.
- ◆ **Valor extremo:** Con carácter general, el término valor extremo se adjudica al valor mayor que una variable aleatoria puede tomar en un número de observaciones dado.
- ◆ **Valor umbral:** Valor por debajo del cual no se espera que aparezca ningún efecto. Variable aleatoria: Función medible que asigna valores reales a los elementos del espacio muestral.
- ◆ **Variable básica:** Se denominan variables básicas a aquellas que caracterizan el agente o la acción en un ciclo, en concreto, el periodo (y la longitud) y la amplitud.
- ◆ **Variable instantánea:** Describen los movimientos instantáneos del fluido, del barco, de las partículas, etc, y pueden ser cinemáticas: velocidad y aceleración de la partícula de fluido; o dinámicas: presiones y tensiones tangenciales en la superficie de la partícula y fuerzas por unidad de volumen.
- ◆ **Varianza:** Medida de la dispersión de una variable aleatoria respecto a su esperanza.
- ◆ **Vida útil:** Periodo de tiempo que transcurre durante la fase de servicio de una obra o un tramo de la misma. En general corresponde al periodo de tiempo en el que la obra o el tramo cumple la función principal para la que fue concebida.
- ◆ **Viento:** Movimiento del aire que está presente en la atmósfera, especialmente en la troposfera, producido como consecuencia de las diferencias en la presión atmosférica producidas por las distintas temperaturas (el aire frío se desplaza hacia abajo y el caliente hacia arriba).
- ◆ **Zona de atraque y amarre:** Espacio donde los buques realizan las operaciones de carga y descarga de mercancías y, en su caso, el embarque y desembarque de pasajeros.
- ◆ **Zona de fondeo:** Lugar donde se localiza una embarcación restringiendo parcialmente sus movimientos, por ejemplo, mediante la utilización de una o varias anclas.
- ◆ **Zona de maniobra:** Franja aneja al área abrigada para facilitar las maniobras del buque.
- ◆ **Zona de rompientes:** Se caracteriza por la rotura del oleaje y los procesos relacionados con ella; su anchura puede variar entre las decenas y los centenares de metros.



Comentarios y ejemplos

COMENTARIOS

- ◆ Esquema del proceso de acumulación de daño en el ciclo de solicitud, Artículo 2.4.3
- ◆ Evolución temporal de la probabilidad de fallo acumulado, Artículo 2.4.4
- ◆ Secuencia para estimar los parámetros del modelo de evolución de daño, Artículo 2.4.4
- ◆ Diagramas de componentes en otros textos técnicos, Artículo 3.3.2
- ◆ Diseño sin y con estrategia de reparación, Artículo 3.7.1
- ◆ Esquema de árbol de decisión para un árbol de desencadenamiento y posibles estrategias de reparación, Artículo 3.7.2
- ◆ Correspondencia entre la probabilidad conjunta de fallo (Tabla 4.2) y las Variantes y Métodos de Nivel I, II y III, Artículo 4.1.1

EJEMPLOS

- ◆ Modelo acumulativo del volumen de rebase en un ciclo de solicitud, Artículo 2.4.5
- ◆ Jerarquía espacial en un dique de abrigo: tramos, subsistemas y diagrama de modos de fallo, Artículo 3.3.1
- ◆ Árboles de desencadenamiento y propagación del fallo para diferentes tramos, subsistemas y modos, Artículo 3.6.1
- ◆ Función de distribución del margen de seguridad en un dique con cámara oscilante frontal, Artículo 4.3.4
- ◆ Cálculo de costes totales de un dique en talud, Artículo 5.3.3
- ◆ Cálculo de la fdp de la rentabilidad del proyecto de inversión en función del nivel de avería del dique de abrigo, Artículo 5.5.4

Bibliografía

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Castillo, E. (2012). *Extreme value theory in engineering*. Elsevier.

Kottegoda, N.T. y Rosso, R. (2008). *Applied statistics for civil and environmental engineers*. Blackwell Chichester, UK.

Losada, M. A. (1989). «Recent developments in the design of mound breakwaters». En: *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. University of Cantabria. Capítulo 21.

ARTÍCULOS REFERENCIADOS

Burcharth, H. F. (1992). «Reliability evaluation of a structure at sea». En: *Design and Reliability of Coastal Structures, short course during the 23rd ICCE in Venice* (véase página 10, 102).

Castillo, M., Castillo, E., Fernández-Castelli, A., Molina, R. y Gómez, R. (2012). «Stochastic Model for Damage Accumulation in Rubble-Mound Breakwaters Based on Compatibility Conditions and the Central Limit Theorem». En: *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 138.451-463 (véanse páginas 63, 67, 68, 166).

Clavero, M., Vílchez, M., Pérez, D., Benedicto, M. I. y Losada, M. A. (2012). «An unified design method of maritime works against waves». En: *Coastal Engineering Proceedings* 1.33, página 76 (véase página 95).

Jalón, M. L., Lira-Loarca, A., Baquerizo, A., and Losada, M. A. (2018). "An analytical model for oblique wave interaction with a partially reflective harbor structure". En: *Coastal Engineering*. ISSN: 0378-3839. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.10.015>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383918302679> (véase página 148).

Kortenhaus, A. y Oumeraci, H. (1998). «Classification of wave loading on monolithic coastal structures». En: *Proc. of the 26st International Coastal Engineering Conferece, ASCE*, páginas 867-880 (véase página 10, 91).

Mínguez, R., Castillo, E., Castillo, C. y Losada, M. A. (2006). «Optimal cost design with sensitivity analysis using decomposition techniques. Application to composite breakwaters». En: *Structural Safety* 28.4, páginas 321-340 (véanse páginas 171, 172).

Molines, J., Herrera, M. P. y Medina, J. R. (2018). «Estimations of wave forces on crown walls based on wave overtopping rates». En: *Coastal Engineering* 132, páginas 50-62 (véase página 68).

Pérez-Romero, D. M., Ortega-Sánchez, M., Moñino, A. y Losada, M. A. (2009). «Characteristic friction coefficient and scale effects in oscillatory porous flow». En: *Coastal Engineering* 56.9, páginas 931-939 (véase página 129).

PIANC (2016). Recommendations for the increased durability and service life of new marine concrete infrastructure. Report 162. PIANC (véase página 41).

- Sanchidrián, I. (2001). «Consideración de los riesgos accidentales en los métodos de dimensionamiento de las áreas de navegación y flotación». En: *Información mensual de Puertos del Estado* 86, páginas 65-80 (véase página 185).
- Solari, S. y Van Gelder, P. (2011). «On the use of Vector Autoregressive (VAR) and Regime Switching VAR models for the simulation of sea and wind state parameters». En: *Marine Technology and Engineering* (véase página 79).
- Van Gent, M. y Van derWerf, I. (2014). «Toe Stability of Rubble Mound Breakwaters». En: *Coastal Engineering Proceedings* 1.34, página 22 (véase página 169).
- Van der Meer, J. W. (1988). «Stability of Cubes, Tetrapodes and Accropode». En: *Proceedings of the Breakwaters '88 Conference; Design of Breakwaters*. Editado por L. Institution of Civil Engineers Thomas Telford, páginas 71-80 (véase página 64).
- Vílchez, M., Moyano, J., Clavero, M., Miguel, M. y Losada, M. (2011). «Forces and subpressures on nonover-toppable vertical breakwaters». En: *Proceedings of the 6th International Conference of Coastal Structures* (véase página 95).
- Vílchez, M., Clavero, M. y Losada, M. A. (2015). «Verification of Rock Toe Stability Applying the Hydraulic Performance Curves». En: *Proceedings of the Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters 2015* (véase página 169).
- Vílchez, M., Clavero, M., Lara, J. L. y Losada, M. A. (2016a). «A characteristic friction diagram for the numerical quantification of the hydraulic performance of different breakwater types». En: *Coastal Engineering* 114, páginas 86-98 (véase página 129).
- Vílchez, M., Clavero, M. y Losada, M. A. (2016b). «Hydraulic performance of different nonovertopped breakwater types under 2D wave attack». En: *Coastal Engineering* 107, páginas 34-52 (véase página 95).
- Vílchez, M., Clavero, M., Baquerizo, A. y Losada, M. A. (2017). «An Approximation to the Statistical Characteristics of Wind Waves in Front and from the Toe of the Structure to the Toe of the Crown of Nonovertopped Breakwaters». En: *Coastal Engineering Journal* 59.03, página 1750012 (véase página 68).

LIBROS REFERENCIADOS

- CE (2002). *Guía del análisis costes-beneficios de los proyectos de inversión*. DG Política Regional de la Comisión Europea (véanse páginas 16, 159).
- MEIPOR-16 (2016). *Revisión y Actualización del Método de Evaluación de Inversiones Portuarias (MEIPOR)*. Puertos del Estado (véanse páginas 15, 16, 36, 80, 128, 159, 160, 161, 166, 172, 175, 176, 177, 178, 216, 217).
- PIANC (2016). *Criteria for the selection of breakwater types and their related optimum safety levels*. Report 196. PIANC (véanse páginas 10, 41, 47, 80, 100, 101, 174, 176).
- ROM 0.0-01 (2001). *ROM 0.0. Procedimiento General y las Bases de Cálculo en el Proyecto*. Puertos del Estado, página 218. ISBN: 84-88975-30-9 (véanse páginas 15, 16, 19, 24, 25, 29, 39, 42, 45, 48, 70, 71, 73, 78, 79, 80, 81, 110, 115, 123, 124, 125, 127, 128, 130, 132, 133, 135, 138, 139, 140, 148, 159, 160, 172, 173, 174, 178, 179, 184).
- ROM 0.5-05 (2005). *ROM 0.5.-05. Geotecnia para las Obras Marítimas y Portuarias*. Puertos del Estado. ISBN: 84-88975-52-x (véanse páginas 16, 42, 103, 139, 142).
- ROM 1.0-09 (2009). *ROM 1.0-09. Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo*. Puertos del Estado. ISBN: 978-84-88975-73-7 (véanse páginas 15, 16, 24, 29, 39, 42, 47, 48, 50, 52, 53, 71, 79, 80, 91, 92, 109, 124, 128, 135, 142, 155, 172).
- ROM 2.0-II (2011). *ROM 2.0-II. Obras de atraque y amarre: Criterios generales y Factores de Proyecto*. Puertos del Estado. ISBN: 978-84-88975-78-2 (véase página 16, 42).
- ROM 5.1-I3 (2013). *ROM 5.1-I4. Calidad del Agua Litoral en las Áreas Portuarias*. Puertos del Estado. ISBN: 978-84-88975-81-2 (véanse páginas 42, 92).
- ROM 0.2-90 (1990). *ROM 0.2-90: acciones en el proyecto de obras marítimas y portuarias*. Puertos del Estado. ISBN: 9788474337013 (véase página 80).
- ROM 3.1-99 (1999). *ROM 3.1-99. Configuración Marítima de los Puertos: Canales de Acceso y Áreas de Flotación*. Puertos del Estado. ISBN: 978-84-49805-13-4 (véanse páginas 16, 42, 185).
- Suárez Bores, P. (1976). *Optimización de obras marítimas*. Universidad Politécnica de Madrid (véase página 176).

OTROS DOCUMENTOS REFERENCIADOS

- Benedicto, I. (2004). «Comportamiento y evolución de la avería de los diques de abrigo frente a la acción del oleaje». Tesis doctoral. Universidad de Granada (véase página 58).
- Campos, A. (2016). «A methodology for the analysis of damage progression in rubble mound breakwaters.» Tesis doctoral. Universidad de Castilla-La Mancha (véase página 58).
- Clavero, M. (2007). «Comportamiento de los diques en talud frente a la acción del oleaje y criterios para el reparto de la probabilidad conjunta de fallo en la vida útil». Tesis doctoral. Granada (véase página 58).
- Gómez-Martín, E. (2015). «Análisis de la evolución de averías en el manto principal de diques en talud formado por escolleras, cubos y cubípodos». Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia (véase página 58).
- Guanche, R. (2007). «Análisis de la funcionalidad y estabilidad de obras marítimas mediante un modelo numérico basado en las ecuaciones de Reynolds.» Tesis doctoral. Universidad de Cantabria (véase página 58).
- IH Cantabria y McValnera (2018). *Aplicación metodológica del análisis de rentabilidad económico-financiera del proyecto de construcción e inversión de una obra marítima mediante el uso dual ROM-MEIPOR*. Informe técnico (véase página 179).
- Lara, J. L., Rujú, A. y Losada, I. J. (2011). «RANS modelling of long waves induced by a transient wave group on a beach». En: *Proceedings of the Royal Society A*. Volumen 467, páginas 1215-1242 (véase página 92).
- Maciñeira, E. (2005). «Determinación de una fórmula para el cálculo de la estabilidad del morro de los diques en talud. Análisis de los distintos factores que intervienen.» Tesis doctoral. Universidad de A Coruña (véase página 58).

Indicadores Económico-Financieros MEIPOR

El objetivo de este Anejo es recoger las definiciones de algunos de los indicadores que se utilizan en MEIPOR 2016 para el análisis de la rentabilidad económica y financiera, la sostenibilidad financiera y la evaluación del riesgo del Proyecto de Inversión y, cuando corresponda, las ecuaciones para su evaluación. Se incluyen sólo aquellos indicadores que intervienen en la optimización dual y favorecen el diálogo técnico, financiero y económico entre la ROM I.1-18 y aquel Manual de Inversiones. El sentido de este Anejo es informativo, por lo que conviene consultar su fuente original, MEIPOR 2016.

INDICADORES FINANCIEROS Y ECONÓMICOS

De acuerdo con MEIPOR se definen dos indicadores de la rentabilidad, (a) financiera y (b) económica.

Indicadores de rentabilidad financiera, (IRF)

Se definen los IRF del proyecto (IRFP) y los del capital (IRFC).

Indicadores de la rentabilidad financiera del proyecto, (IRFP)

Se incluyen los siguientes,

- ◆ **Valor Actual Neto Financiero del proyecto VANF (I)**

Es la suma del valor de los flujos diferenciales del proyecto descontados al primer año del contrato a través de la definición de una Tasa Financiera de Descuento del proyecto adecuada para cada agente (ecuación 5.4).

$$VANF(I) = \sum_{t=0}^T \frac{(\Delta FC_{\text{proy}})_t}{(1 + i_{\text{financ.proy}})^t} \quad (5.4)$$

Donde

- $VANF(I)$: Valor Actual Neto Financiero del proyecto.
 - $(\Delta FC_{proy})_t$: Flujos de caja libre diferenciales del proyecto para el agente considerado en el año t entre las situaciones con y sin proyecto.
 - $I_{financ.proy}$: Tasa Financiera de Descuento del proyecto considerada.
 - t : Año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en el año 0).
 - T : Número de años de horizonte temporal del proyecto.
- ◆ **Tasa Interna de Rentabilidad Financiera del proyecto TIRF (I)**
Es la tasa de descuento financiero que conduce a un VANF (I) igual a 0. Se calcula a partir de la ecuación 5.5,

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{(\Delta FC_{proy})_t}{[1 + TIRF(I)]^t} \quad (5.5)$$

Donde

- $TIRF(I)$: Tasa Interna de Rentabilidad Financiera del proyecto.
- $(\Delta FC_{proy})_t$: Flujos de caja libre diferenciales del proyecto para el agente considerado en el año t entre las situaciones con y sin proyecto.
- t : Año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en el año 0).
- T : Número de años de horizonte temporal del proyecto.

Indicadores de la rentabilidad financiera del capital, (IRFC)

Se incluyen los siguientes,

- ◆ **Valor Actual Neto Financiero del Capital VANF (C)**
Es la suma del valor de los flujos diferenciales del proyecto descontados al primer año del contrato a través de la definición de una Tasa Financiera de Descuento del Capital adecuada para cada agente. Se calcula de manera similar al VANF (I) (ecuación 5.4), pero utilizando el valor de la tasa de descuento financiera del capital y los flujos de caja diferenciales del capital.
- ◆ **Tasa Interna de Rentabilidad Financiera del Capital TIRF (C)**
Es la tasa de descuento financiero que conduce a un VANF (C) igual a 0. Se calcula de manera equivalente al TIRF (I) (ecuación 5.5), pero utilizando los flujos de caja diferenciales del capital.

Indicadores de la rentabilidad económica

Se incluyen el valor actual neto económico del proyecto (VANE I) y la tasa interna de rendimiento económico (TIRE I).

- ◆ **Valor Actual Neto Económico del proyecto VANE (I)**
Es la suma del valor de los flujos diferenciales del proyecto descontados al primer año del contrato a través de la definición de una Tasa Financiera de Descuento del proyecto adecuada para cada agente (ecuación 5.6).

$$VANE(I) = \sum_{t=0}^T \frac{(\Delta E_{total})_t}{(1 + i_{social})^t} \quad (5.6)$$

Donde

- $VANE(I)$: Valor Actual Neto Económico del proyecto.
- $(\Delta E_{total})_t$: Variación del excedente total del año t .
- i_{social} : Tasa “social” de descuento del proyecto.
- t : Año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en el año 0).
- T : Número de años de horizonte temporal del proyecto.

◆ **Tasa Interna de Rendimiento Económico TIRE (I)**

Es la tasa de descuento financiero que conduce a un VANF (I) igual a 0. Se calcula a partir de la ecuación 5.7,

$$0 = \sum_{t=0}^T \frac{(\Delta E_{total})_t}{[1 + TIRE(I)]^t} \quad (5.7)$$

Donde

- $TIRE(I)$: Tasa Interna de Rentabilidad Económica del proyecto.
- $(\Delta E_{total})_t$: Variación del excedente total del año t .
- t : Año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en el año 0).
- T : Número de años de horizonte temporal del proyecto.

OTROS ELEMENTOS E INDICADORES

Se incluyen los flujos de caja, la ratio de cobertura del servicio de deuda, el periodo de recuperación y la variación del excedente total.

Flujos de caja

Se incluyen los flujos de caja libres y netos del proyecto y del capital.

◆ **Flujos de caja libres del proyecto**

Se considerarán para cada año temporal y agente las siguientes entradas y salidas, considerando las diferencias entre el escenario con y sin proyecto:

- Entradas: ingresos de operación y valor residual de la inversión.
- Salidas: costes de inversión, costes de operación e impuestos.

◆ **Flujos de caja netos del proyecto**

Se considerarán para cada año temporal y agente las siguientes entradas y salidas, considerando las diferencias entre el escenario con y sin proyecto:

- Entradas: ingresos de operación y financiación total recibida (aportación de recursos propios y/o ajenos).
- Salidas: costes de inversión, costes de operación, impuestos y costes de financiación (devolución de principal e intereses).

◆ **Flujos de caja libres del capital**

Se añadirá para cada año temporal y agente a los flujos de caja libres del proyecto, los correspondientes a la financiación con recursos ajenos de los costes de inversión. De ello resultan las siguientes entradas y salidas, considerando las diferencias entre el escenario con y sin proyecto:

- Entradas: ingresos de operación, valor residual de la inversión y financiación ajena recibida (préstamos y subvenciones) por el agente considerado.
- Salidas: costes de inversión, costes de operación, impuestos y costes de financiación (devolución de principal e intereses).

Ratio de cobertura del servicio de deuda

Mide la posibilidad de repago de la deuda (devolución de principal e intereses) con los flujos de caja generados por el proyecto. Se calcula mediante la ecuación 5.8,

$$(Cobertura_{servicio.deuda})_t = \frac{(\Delta I_{op})_t - [(\Delta C_{op})_t + (\Delta C_{imp})_t]}{(\Delta C_{financ})_t} \quad (5.8)$$

Donde

- ◆ $(Cobertura_{servicio.deuda})_t$: Ratio de cobertura del servicio de la deuda para el agente en el año t .
- ◆ $(\Delta I_{op})_t$: Ingresos de operación en el año t entre la situación con y sin proyecto.
- ◆ $(\Delta C_{imp})_t$: Pagos de impuestos en el año t entre la situación con y sin proyecto.
- ◆ $(\Delta C_{op})_t$: Costes de operación en el año t entre la situación con y sin proyecto.
- ◆ $(\Delta C_{financ})_t$: Costes de financiación (devolución de principal e intereses) en el año t entre la situación con y sin proyecto.
- ◆ t : Año de cálculo dentro del horizonte del Proyecto de Inversión.

Periodo de recuperación

Se incluyen los periodos de recuperación de la inversión (I) y del capital (C).

◆ Período de recuperación de la inversión (I)

Es el tiempo que se tardará en recuperar la inversión inicial con los flujos de explotación del proyecto. Se calcula a partir de la ecuación 5.9,

$$0 = \sum_{t=0}^{Payback(I)} (\Delta FC_{proy})_t \quad (5.9)$$

Donde

- ◆ $Payback(I)$: Período de recuperación de la inversión (I).
 - ◆ $(\Delta FC_{proy})_t$: Flujos de caja libre diferenciales del proyecto para el agente considerado en el año t entre las situaciones con y sin proyecto.
 - ◆ t : Año correspondiente en horizonte temporal del proyecto (comenzando en el año 0).
- ◆ **Período de recuperación del capital (C)**
Es el tiempo que se tardará en recuperar los recursos propios aportados. Se calcula de manera similar al Payback (I) (ecuación 5.9), pero utilizando los flujos de caja diferenciales del capital.

Variación del excedente total

Se evalúa en cada año del horizonte temporal y corresponde a la suma de las variaciones del excedente del productor y el consumidor, así como a las externalidades, entre las que se cuentan las variaciones del excedente de (i) la Autoridad Portuaria, (ii) el Inversor/Operador partícipe, (iii) otras Autoridades Portuarias, (iv) otros operadores de la cadena de transporte y (v) la sociedad/colectividad. El cálculo detallado de estos excedentes se describe en MEIPOR-16.

SOSTENIBILIDAD FINANCIERA

Se considera que un proyecto es financieramente sostenible para un agente cuando en cada año del horizonte temporal considerado los flujos de caja netos acumulados son positivos:

$$\exists \text{ Sostenibilidad Financiera si } \sum_{t=0}^{t'} (FC_{netos})_t > 0 \quad \forall 0 < t' < T \quad (5.10)$$

Donde

- ◆ $(FC_{netos})_t$: Flujos de caja netos para un agente en el año t entre las situaciones con y sin proyecto.
- ◆ t' : Año de cálculo dentro del horizonte del Proyecto de Inversión.
- ◆ T : Número de años considerados para el proyecto.

Por su importancia para el cálculo de la sostenibilidad, debe considerarse con precisión el calendario de entradas y salidas de efectivo.

NIVEL DE RIESGO ACEPTABLE

En MEIPOR-16 el nivel del riesgo se caracteriza, con distinto grado de detalle, de dos modos posibles:

- (a) a través de la función de distribución de los indicadores de rentabilidad financiera y económica, o bien
- (b) a través del valor esperado de dichos indicadores.

En el primer caso (a) se evalúa la probabilidad de que los indicadores estén por debajo de un valor crítico considerado aceptable y se comprueba si esta probabilidad supera o no a una de referencia. En el segundo caso (b) se evalúa si el valor esperado supera un valor límite aceptable.

Redacción de la ROM 1.1-18

Esta ROM 1.1-18 “*Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo*” ha sido redactada por el ponente Miguel Ángel Losada Rodríguez (Universidad de Granada) bajo el mandato del Organismo Público Puertos del Estado adscrito al Ministerio de Fomento en un Grupo de Trabajo Permanente, adoptándose sus acuerdos mediante consenso tras debates por la Comisión Técnica formada por los siguientes expertos asistentes:

Arana Burgos, Manuel (Puertos del Estado, España)
Besio, Giovanni (USG, Italia)
Esteban Lefer, Francisco (FCC, España)
Folgueras Rodríguez, Pedro (IISTA, España)
González Herrero, José Manuel (Acciona Ingeniería, España)
da Graça Neves, Maria (LNEC, Portugal)
López Lara, Javier (IH Cantabria, España)
Martín Soldevilla, Ma Jesús (CEPYC-CEDEX, España)
Medina Folgado, Josep Ramon (UPV, España)
Moyano Retamero, José (Autoridad Portuaria de Málaga, España)
Sanchidrián Fernández, Carlos (PROES Consultores, España)
de los Santos Ramos, Francisco (Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, España)
Silva Casarín, Rodolfo (UNAM, México)
Solari, Sebastián (IMFIA, Uruguay)

Los siguientes expertos han realizado comentarios y críticas al contenido del articulado:

Benedicto Iruñi, Izaskun (PROES Consultores, España)
Peña González, Enrique (UDC, España)

Los siguientes miembros del Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada han contribuido a la elaboración de la ROM 1.1-18 “*Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo*”:

Baquerizo Azofra, Asunción
Bello Millán, Francisco J.
Bergillos Meca, Rafael J.
Clavero Gilabert, María
Cobos Budía, Manuel

Díaz Carrasco, Pilar
Folgueras Rodríguez, Pedro
Jiménez Portaz, María
Lira Loarca, Andrea M.
Magaña Redondo, Pedro J.
Ortega Sánchez, Miguel
del Rosal Salido, Juan
Vílchez Solís, Montserrat

Los siguientes participantes fueron invitados a la revisión y discusión del Borrador de la Ponencia en la Asamblea celebrada el 30 de mayo de 2018:

Ametller Malfaz, Sergi (SENER)
Antunes, António (Etermar)
Arana Burgos, Manuel (Puertos del Estado)
Barceló Vogt, Mateo (CA Baleares)
Bayarri Cebrián, Francisco José (Generalitat Valenciana)
Bayo Martínez, Antonio (AP Almería)
Benedicto Iruñ, Izaskun (PROES)
Besio, Giovanni (Università Degli Studi di Genova)
Brògueira Dias, Emílio (Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo)
Burgos Teruel, Marcelo (AP Valencia)
Cánovas Losada, Íñigo (PROINTEC)
Castellote Armero, Marta (ICC Eduardo Torroja)
Castillo Cano-Cortés, Luis Castillo (AYESA)
Clavero Gilabert, María (Universidad de Granada)
Corral López, Jesús (OPTIMASIPU)
Corredor Molguero, Antonio (OHL)
de los Santos Ramos, Francisco Javier (AP Bahía de Algeciras)
Díez Rilova, Margarita (Generalitat de Catalunya)
Díez Rubio, Galo (DG Costas)
Enamorado Martínez, César Andrés (Ferrovia)
Escartín García, F. Javier (MARCIGLOB)
Esteban Lefler, Francisco (FCC)
Fernández-Alonso Trueba, Macario (MCVALNERA)
Ferrante, Andrea (Ministro delle Infrastrutture, Italia)
Folgueras Rodríguez, Pedro (Universidad de Granada)
García Hernández, Sara (AP Alicante)
García Pérez, Francisco (AP Motril)
García-Valdecasas Bernal, José María (Puertos del Estado)
Gómez-Martín, M. Esther (Universitat Politècnica de València)
González Herrero, Jose Manuel (ACCIONA Ingeniería)
González Patiño, Noelia (DRAGADOS)
Iglesias Rodríguez, Gregorio (University of Plymouth)
Lope Carvajal, Ana (Puertos del Estado)
López Lara, Javier (Universidad de Cantabria)
Maciñeira Alonso, Enrique (AP Coruña)
Martín Soldevilla, María Jesús (CEDEX-CEPYC)
Medina Villaverde, José María (BTP Infraestructuras)
Molina Sánchez, Rafael (Universidad Politécnica de Madrid)
Mora Quintero, Javier I. (AP Tenerife)
Moyano Retamero, José (AP Málaga)
Muñoz-Calero, Ramón (AP Gijón)
Nasarre López, Jorge (AP Baleares)
Negro Valdecantos, Vicente (Universidad Politécnica de Madrid)

Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo

Neves, Maria Graça (Laboratório Nacional de Engenharia Civil)
Ollero Marín, Manuel (CA Andalucía)
Paramio Cabrera, Juan Manuel (AP Melilla)
Peña González, Enrique (Universidade da Coruña)
Peña López-Pazo, Alfonso (AP Huelva)
Pérez Rubio, Susana (Puertos del Estado)
Pindado Rodríguez, Miguel Ángel (AP Barcelona)
Pita Olalla, Eloy (INCREA)
Quevedo Baquerizo, Elena (SENER)
Rezabal Arocena, Saioa (CA País Vasco)
Robert Lopes, Miguel (CONSULMAR)
Rodríguez Dapena, Álvaro (Puertos del Estado)
Rodríguez Arevalo, Ignacio
Rodríguez-Rubio Mediavilla, Pablo (AP Bahía de Algeciras)
Sánchez Luzón, Olga Ma (AP Avilés)
Sanchidrián Fernández, Carlos (PROES)
Segura Ballesté, Carles (AP Tarragona)
Suñé Recio, Juan Carlos (AP Bahía de Algeciras)
Tomasicchio, Giuseppe (Università del Salento)
Valdés Fernández de Alarcón, José María (CEDEX-CEPYC)
Vara Plazas, José (Berenguer Ingenieros)
Varela de Andres, Jose Antonio (SACYR)
Vázquez Romero, Miguel (DRAGADOS)
Vidal Pascual, César (Universidad de Cantabria)

Por último, la ROM 1.1-18 “Recomendaciones para el Proyecto de Construcción de Diques de Abrigo” ha contado con la colaboración del siguiente instituto:

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (Universidad de la República, Uruguay)

