



## ESPECIFICACIONES PARA LA VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL EN CANAL Y TANQUE DE OLEAJE

### **Preámbulo**

---

El objetivo del anejo *Especificaciones para la verificación experimental en canal y tanque de oleaje* es proporcionar criterios y normas de buena práctica para el diseño y realización de ensayos de laboratorio en canal y tanque de oleaje. Este anejo ha sido redactado por el Grupo de Dinámica de Flujos Ambientales de la Universidad de Granada. La redacción de este anejo se ha basado principalmente en las recomendaciones incluidas en Benedicto y Losada (2002), Frostick y col. (2011) y Hughes (1993).

---

G.1. Condicionantes para la realización de un modelo físico . . . . .	107
G.2. Fundamentos . . . . .	107
G.2.1. Principios de similitud . . . . .	107
G.2.2. Efectos de escala . . . . .	108
G.2.3. Tipos de ensayos . . . . .	109
G.2.4. El laboratorio de ingeniería marítima . . . . .	109
G.3. Ensayos de diques de abrigo . . . . .	111
G.3.1. Objetivos . . . . .	111
G.3.2. Selección de la instalación . . . . .	112
G.3.3. Selección de la escala . . . . .	112
G.3.4. Configuración del modelo . . . . .	113
G.3.5. Oleaje . . . . .	114
G.3.6. Limitaciones . . . . .	120
G.4. Análisis de datos . . . . .	120
G.4.1. Análisis estadístico y espectral . . . . .	120
G.4.2. Separación del oleaje incidente y reflejado . . . . .	121
G.4.3. Análisis del daño . . . . .	123
Referencias . . . . .	124

---

Los modelos físicos, junto con los modelos numéricos y medidas “in situ”, proporcionan al ingeniero herramientas para el diseño de obras marítimas, en particular los diques de abrigo. En el ámbito de la ingeniería marítima, el modelo físico es la reproducción a escala reducida de las magnitudes más representativas del dique a ensayar, conocido como prototipo.

El modelo físico es, por tanto, la reproducción de un prototipo para la realización de medidas sobre él, que después serán transformadas a la escala de prototipo.

## **G.1 Condicionantes para la realización de un modelo físico**

Para el diseño de los diques de abrigo es necesario el conocimiento de su comportamiento hidráulico, para lo cual se emplean métodos analíticos, empíricos o numéricos, que suponen la asunción de una serie de simplificaciones. Si el dique a diseñar difiere mucho de las condiciones ideales para las cuales se han obtenido las fórmulas de diseño, la incertidumbre respecto a la validez de los métodos empleados aumenta. Por tanto, para estructuras alejadas de las situaciones ideales, en geometría o en condiciones de contorno, los ensayos en modelo físico se hacen necesarios para asegurar un conocimiento preciso del comportamiento del dique.

Se recomienda la realización de ensayos en modelo físico cuando se presente alguna de las siguientes situaciones:

- La obra tiene una repercusión económica, social o ambiental media o alta
- La estabilidad de la estructura no está asegurada al aplicar métodos analíticos, formulaciones semi-empíricas o modelo numéricos
- El diseño debe ser optimizado
- El rebase es el modo de fallo principal de la obra
- Se espera la aparición de presiones impulsivas sobre el espaldón y pueden dañar la obra
- Se necesita analizar fenómenos complejos tales como rotura del oleaje
- La batimetría frente a la obra es compleja
- Se requiere estudiar el comportamiento de los entronques entre tramos

## **G.2 Fundamentos**

### **G.2.1 Principios de similitud**

La Teoría de Similitud proporciona las herramientas para planificar los ensayos en modelo físico y extrapolar a escala de prototipo las medidas realizadas a escala de modelo. La teoría de los modelos físicos se basa en que, a partir de las magnitudes fundamentales (longitud  $L$ , tiempo  $t$  y masa  $m$ ), las restantes que intervienen en la mecánica de fluidos queden predeterminadas (magnitudes derivadas) y en que en este sistema ( $L$ - $t$ - $m$ ) las ecuaciones hidrodinámicas del fluido son adimensionales y por lo tanto se mantienen invariantes frente a una transformación del tipo:

$$L_P = \lambda L_M; \quad t_P = \lambda_t t_M; \quad m_P = \lambda_m m_M; \quad (\text{G.1})$$

donde el subíndice M indica magnitud a escala modelo y el subíndice P magnitud a escala prototipo. De esta manera, si se conoce el comportamiento en el modelo de un determinado fenómeno, teóricamente es posible deducir el de dicho fenómeno en el prototipo, sin más que utilizar para cada magnitud el cambio de escala según los valores de los parámetros  $\lambda$ ,  $\lambda_t$  y  $\lambda_m$  adoptados en la transformación anterior. A dicha transformación se la conoce como *semejanza*, que puede ser geométrica (semejanza en longitud), cinemática (en tiempo) o dinámica (en masa). La *semejanza geométrica* determina que la relación entre dimensiones homólogas modelo-prototipo es constante, denominándose a dicha relación escala geométrica ( $\lambda$ ). En esta semejanza, por tanto, sólo influyen aspectos de forma. La *semejanza cinemática* implica la similitud de movimientos modelo-prototipo, lo que junto a la semejanza geométrica determina que las trayectorias de las partículas homólogas modelo-prototipo sean semejantes. Por último, la *semejanza dinámica* entre dos sistemas geométrica y cinemáticamente semejantes supone la constancia entre la relación de masas y, por tanto, de fuerzas entre elementos homólogos. En la práctica, resulta imposible lograr una similitud dinámica perfecta ya que la relación entre fuerzas que actúan sobre modelo y prototipo no se mantiene constante, ni su importancia en ambos sistemas es la misma. Sin embargo, en ensayos de diques de abrigo es suficiente considerar una semejanza dinámica parcial, basada en las fuerzas predominantes en cada caso.

En la mayoría de ensayos en modelo físico en ingeniería marítima las fuerzas predominantes son las de gravedad y viscosidad, pudiendo despreciarse las fuerzas de tensión superficial o elásticas. Por ello, se adopta el criterio de considerar como fuerza principal la gravedad (semejanza de Froude, escala geométrica  $\lambda$ ), obteniéndose las escalas de las magnitudes derivadas que se muestran en la Tabla G.1.

Magnitud	Dimensión	Criterio de semejanza
Tiempo ( $\lambda_t$ )	$T$	$\lambda^{1/2}$
Masa ( $\lambda_m$ )	$M$	$\lambda^3$
Velocidad	$LT^{-1}$	$\lambda^{1/2}$
Velocidad angular	$T^{-1}$	$\lambda^{-1/2}$
Aceleración	$LT^{-2}$	1
Caudal	$L^3T^{-1}$	$\lambda^{5/2}$
Fuerza	$MLT^{-2}$	$\lambda^3$
Presión	$ML^{-1}T^{-2}$	$\lambda$

Tabla G.1: Escalas de las magnitudes derivadas empleando Semejanza de Froude

## G.2.2 Efectos de escala

Como se ha comentado anteriormente, no es posible establecer una similitud perfecta entre modelo y prototipo. En las escalas habitualmente utilizadas, no existen fluidos que, en el modelo reducido, presenten las características necesarias de viscosidad, tensión superficial y módulo de elasticidad. Por tanto, las desviaciones entre el comportamiento y las medidas realizadas en modelo y prototipo son inevitables, lo que se conoce como *efecto escala*. Conocida la existencia del efecto escala en los ensayos en modelo físico reducido, la solución es cuantificar la influencia de los efectos de escala y corregirlos en el proceso de extrapolación a prototipo. En los ensayos sobre diques de abrigo se emplea generalmente la semejanza de Froude. En este caso, las fuerzas

viscosas vendrán falseadas. Es necesario entonces determinar la zona influida por los efectos de escala y asegurar que en el modelo se trabaja con una turbulencia suficiente para asegurar el correcto desarrollo de los fenómenos señalados, o corregir en la extrapolación. Los efectos de escala más importantes aparecerán en las fuerzas de fricción. En general, la solución pasa por utilizar una escala suficientemente grande. En lo que se refiere a las fuerzas de tensión superficial, el efecto escala puede ser importante si la zona de interés es de poca profundidad o entre los fenómenos preponderantes está la rotura del oleaje. En estos casos, es forzoso utilizar una escala lo mayor posible.

Para evitar en la medida de lo posible el efecto escala se puede optar por emplear un diagrama de fricción a través del cual se seleccione el tamaño del material, tanto para el núcleo como para las capas secundarias en los experimentos a escala reducida (Pérez, 2008).

### G.2.3 Tipos de ensayos

#### **Comportamiento del dique: comportamiento hidráulico, estabilidad y funcionalidad**

Los ensayos de diques de abrigo tienen por finalidad estudiar para la tipología seleccionada su estabilidad, medir esfuerzos, evaluar posibles averías, cuantificar los rebases producidos por el oleaje o conocer la transmisión del oleaje en el caso de obras permeables o rebasables.

#### **Agitación de dársenas**

El objeto de los ensayos de agitación es conocer el oleaje que se produce en el puerto o en sus zonas de influencia, para evaluar su diseño en planta a efectos de su operatividad general y de la navegabilidad en sus accesos y, en su caso, proponer cambios en la planta y/o en las estructuras proyectadas. Los ensayos de resonancia de dársenas se realizan para analizar posibles efectos de resonancia de los periodos asociados a las ondas largas coincidentes con los modos de oscilación de las dársenas. Se destaca la dificultad de estos ensayos consecuencia de lo complejo del fenómeno, de la escasez de medidas en la naturaleza y del amplio rango de periodos de estas ondas, por ello las soluciones que se adopten conviene que sean contrastadas con los registros disponibles o, al menos, con observaciones in situ.

### G.2.4 El laboratorio de ingeniería marítima

#### **Instalaciones**

Las instalaciones empleadas para los ensayos en modelo físico se pueden dividir en: (1) para ensayos 2D (canales de oleaje) y (2) para ensayos 3D (tanques de oleaje).

#### **Canal de oleaje**

Son canales largos y estrechos, con superficie libre del agua y un generador de oleaje en uno de sus extremos. Es deseable que los generadores cuenten con sistemas de control de absorción activa de la reflexión. En el otro extremo se ubica un absorbedor pasivo del oleaje, que puede ser sustituido por una segunda pala generadora. En caso de querer simularse también corriente para estudios de ríos pueden incorporar un sistema de bombeo, además de un sistema basculante que les permita inclinarse. Las dimensiones típicas de los canales de oleaje son:

- Anchura: desde 0,3 m hasta 4,0 m

- Profundidad de agua: desde 0,1 m hasta 1 m
- Longitud: desde 10 m hasta 150 m

Los canales de oleaje se emplean para ensayos en 2D, por tanto en todos los casos la incidencia sobre la sección tipo del dique ensayado será normal.

### **Tanque de oleaje**

Son tanques rectangulares en los que se puede modelar un campo de oleaje bidireccional o multidireccional. Suelen tener anchuras mínimas de 20 – 30 m y máximas de 90 m, y profundidades desde 1 m hasta 10 m en tanques de gran escala diseñados para ensayos en profundidades indefinidas.

Los generadores de oleaje pueden estar fijos en uno de sus lados o ser portátiles, de modo que en cada ensayo se puedan ubicar en la zona más adecuada. Es deseable que los generadores cuenten con sistemas de control de absorción activa de la reflexión.

Para reducir las reflexiones no deseadas por las paredes del tanque se ubican absorbedores pasivos, que pueden consistir en playas tendidas de árido, o elementos absorbedores tipo mallas o elementos porosos.

Algunos tanques también cuentan con sistemas de bombeo para el estudio combinado de oleaje y corrientes.

### **Canal/tanque de oleaje y viento**

En algunos ensayos de diques, por ejemplo si se está analizando la transmisión de oscilaciones por rebase, puede ser necesario añadir como agente forzador el viento. En ese caso se recurre a canales o tanques de acción combinada de viento y oleaje, en los que sobre los generadores de oleaje se añaden túneles de viento cuyas turbinas son capaces de generar vientos de la intensidad requerida.

### **Equipos e instrumentación**

La instrumentación más frecuente utilizada en los ensayos es: sensores de medida de superficie libre, sensores de presión, cámaras fotográficas y de video, medidores de perfil, tanques de rebase y dinamómetros.

Los sensores de nivel (superficie libre) miden el ascenso y descenso de la superficie libre, por lo que a partir de dicha medida se pueden obtener las características del oleaje que actúa sobre el dique. En ensayos en 2D, es necesario colocar un mínimo de tres sensores frente al dique para poder realizar la separación del oleaje incidente y el reflejado.

En ocasiones puede ser necesario evaluar la velocidad del flujo en algunos puntos del modelo. Para ello, se puede recurrir a anemómetros de turbina, o bien a métodos más sofisticados como anemometría de hilo caliente o anemometría láser tipo LDV o PIV.

Las cámaras de fotografía y vídeo se emplean para guardar registros visuales de la evolución de la sección. Igualmente, permiten analizar la forma de rotura del oleaje sobre la estructura.

El daño sufrido por un dique en talud se mide usualmente a través de perfiladores (mecánicos, acústicos, láser) o mediante el uso de técnicas de análisis de imagen.

Para la medición de los rebases, se emplea desde el conteo visual (porcentaje de olas que rebasan) hasta dispositivos de detección basados en los mismos principios que las sondas de oleaje. El volumen de rebase se mide mediante recipientes tarados colocados en la cara interna del dique.

Los esfuerzos en los diques verticales se cuantifican habitualmente utilizando dinamómetros. Estos elementos están basados en la aplicación de bandas extensométricas en tres ejes. Constan de un cilindro solidario a una sección del dique, conectado a otro fijo. La conexión entre los dos cilindros se hace mediante las bandas extensométricas. Al recibir el impacto del oleaje, las fuerzas aplicadas en la sección del dique se transmiten de la parte móvil a la fija, y las bandas extensométricas se deforman, registrándose las componentes horizontal y vertical de la fuerza de impacto, así como el momento sobre el cajón. También se utilizan sensores de presión, de los que se colocan varios alineados en el frente del paramento vertical o el espaldón. Estos sensores basan su funcionamiento en el efecto piezoeléctrico, es decir, la variación de las características conductoras con la presión sobre un cristal. La aplicación de este método tiene la ventaja de que permite definir el perfil instantáneo de presiones producidas por el impacto de las olas sobre el paramento. Los esfuerzos totales se obtendrían en este caso por integración de la curva de presiones a lo largo del frente del dique.

## G.3 Ensayos de diques de abrigo

### G.3.1 Objetivos

El objetivo de estos ensayos es la optimización del diseño de las obras de defensa, tanto si son estructuras en talud como si se trata de cajones con paramento vertical dotados de espaldón. Las formulaciones de diseño existentes permiten elaborar prediseños acertados, pero en ocasiones se hace necesario acudir al laboratorio para evaluar su comportamiento u optimizar el prediseño realizado. En los ensayos de estabilidad puede mantenerse bajo control un gran número de variables de diseño, normalmente superior al que manejan las formulaciones analíticas. Por ello, la realización de ensayos en modelo ofrece ventajas muy importantes con vistas a conocer el comportamiento del dique bajo la acción de las sollicitaciones del mar y mejorar las soluciones iniciales.

El coste de los ensayos representa una fracción ínfima del de la propia obra, y en cambio ofrece una información muy completa acerca de la respuesta de la estructura. La realización de ensayos se traduce en un gran aumento de la seguridad del diseño y puede conllevar importantes ahorros en los costes de construcción, en el caso de que la obra esté sobredimensionada, o en los de conservación, si está infradimensionada.

Los principales ensayos que se realizan y sus aplicaciones más frecuentes son:

- Diques en talud
  - Estabilidad de la estructura
  - Evolución temporal de las averías
  - Balance de energía: reflexión, transmisión, disipación

- Rebase
- Diques verticales
  - Fuerzas y momentos sobre el cajón
  - Estabilidad de berma de pie
  - Balance de energía: reflexión, transmisión, disipación
  - Rebase y diseño de espaldones

### G.3.2 Selección de la instalación

En primer lugar, se deben recopilar los datos previos conocidos de la obra, como son: objetivo del ensayo, tipología (secciones tipo), materiales (tamaño de piezas, densidad), batimetría del área de estudio, clima marítimo, modos de fallo a analizar y nivel de daño admitido.

En base a la información disponible, se debe seleccionar la instalación de ensayo y las características fundamentales del mismo (escala, capacidad del sistema de generación, magnitudes básicas de la obra), a partir de las siguientes premisas:

- Los ensayos 2D se emplean fundamentalmente para verificar u optimizar secciones tipo y analizar la interacción oleaje-estructura.
- Los ensayos 3D se realizan cuando es necesario verificar u optimizar cambios de alineación, entronques o morros, analizar efectos de refracción o difracción, cuando el oleaje esperado incide con gran oblicuidad sobre la obra ( $\beta > 30^\circ$ ) o la batimetría frente a la obra es muy irregular.

### G.3.3 Selección de la escala

Generalmente se seleccionan escalas de trabajo pequeñas ( $< 1 : 10$ ). Como primer filtro, la escala seleccionada debe evitar la aparición de efectos de escala significativos. Se elegirá la mayor escala posible. No se deben introducir distorsiones en la escala vertical u horizontal de la geometría del modelo. Deben tenerse en cuenta los siguientes criterios de escala:

- Las dimensiones del dique se escalan geoméricamente.
- Los parámetros del oleaje deben mantener el criterio de Froude.
- En caso de existir mantos o bermas de piezas sueltas, las condiciones de flujo turbulento en el poroso deben mantenerse, lo que se cumple de manera general si se cumple que  $Re = \sqrt{gH_s}D_n/\nu > 3 \cdot 10^4$ , siendo  $Re$  el Número de Reynolds en el modelo,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $H_s$  la altura de ola significativa en el modelo,  $D_n$  el diámetro característico de las piezas y  $\nu$  la viscosidad cinemática.

El escalado de mantos principales y bermas de pie cumplirá la similitud geométrica, de tal manera que la estabilidad de las piezas sea la misma en modelo y prototipo. En cambio, para filtros y núcleo si se cumple la similitud geométrica se tendrán efectos de escala viscosos, ya que estas capas serán más impermeables dando como resultado una reflexión diferente del dique y, por tanto, un comportamiento del mismo no correspondiente con la realidad. Es por ello que estas capas se escalan siguiendo una escala de permeabilidad, por ejemplo, mediante el aumento del tamaño de sus piezas.

### G.3.4 Configuración del modelo

#### Disposición

Una vez seleccionada la instalación (2D-canal de oleaje o 3D-tanque de oleaje), el posicionamiento del modelo dentro de la misma debe ser realizado de tal manera que los efectos de contorno se minimicen, y el oleaje incida sobre el dique con las condiciones deseadas (altura, periodo, dirección de incidencia).

Los ensayos en tanque de oleaje (3D) son especialmente susceptibles de arrojar resultados erróneos si las reflexiones provenientes de los contornos se propagan hacia el área de ensayo y medida. Para evitar estas reflexiones se pueden emplear sistemas de absorción del oleaje, que minimizan la reflexión pero no la eliminan completamente. En caso de requerirse el empleo de muros-guía, para reducir los efectos de difracción, éstos deberán ubicarse paralelos a la dirección del oleaje, de tal modo que no produzcan reflexiones indeseadas.

Cuando la batimetría influya significativamente en el comportamiento de la interacción oleaje-estructura (refracción, difracción, asomeramiento, rotura), el modelado de la misma debe realizarse de manera adecuada. Para ello, para distancias frente al dique superiores a 2 longitudes de onda ( $x > 2L$ ), es suficiente modelar las principales líneas batimétricas. En cambio, en el tramo de fondo más cercano al dique ( $x < 2L$ ), donde los efectos de la interacción del oleaje con el fondo pueden ser significativas en la respuesta del dique, el modelado de la batimetría debe realizarse con más detalle. Es posible despreciar el efecto de la batimetría en caso de tener olas muy pequeñas y grandes profundidades, si se cumplen las siguientes condiciones:

- $\tan \beta < 1 : 250 - 1 : 1000$
- $H_s/h < 0,3$
- $h/L_0 > 0,045$

siendo  $\tan \beta$  la pendiente del fondo,  $H_s/h$  la altura de ola relativa y  $h/L_0$  la profundidad relativa.

La disposición del modelo puede constar de las siguientes zonas: (1) generación, (2) transición, (3) batimetría, (4) dique. Las zonas (2) y (3) sólo aparecerán en el caso de modelarse la batimetría frente al dique. Cada una de las zonas debe tener las siguientes características:

1. La zona de generación debe tener una longitud superior a 3-5 veces la profundidad ( $< 3-5h$ ), de tal manera que se garantice un decrecimiento de los modos evanescentes frente a la pala de generación, así como disponer del espacio suficiente para la colocación de un grupo de sensores para la separación del oleaje incidente y reflejado en la zona de generación. La profundidad de agua en esta zona debe ser tal que se cumpla que  $h/H_s > 3$ .
2. La zona de transición debe ser lo más tendida posible, con un talud máximo de 1:10, creando una transición suave entre la zona de generación y la batimetría modelada.
3. La batimetría entre la zona de transición y el dique debe tener una longitud mínima de 3 a 5 veces la longitud de onda ( $> 3-5L$ ), para asegurar el modelado adecuado de los procesos de asomeramiento y rotura del oleaje.

**Comentario**

Como regla general, los ensayos de diques de abrigo suelen realizarse con fondo fijo, al ser despreciable el comportamiento del fondo en el comportamiento general del dique. En cambio, en algunos casos concretos (evaluación de la erosión del fondo, fallo de la berma de pie...) puede ser necesario modelar un fondo móvil (erosionable).

**Materiales**

Un dique de abrigo puede estar compuesto por elementos sólidos (cajón, espaldón...) o piezas sueltas (escollera, bloques de hormigón, piezas especiales).

Para la construcción de los elementos sólidos se emplea generalmente metal, madera, hormigón o plástico sinterizado. Si son elementos estructurales deben garantizar una rigidez suficiente para resistir las cargas. En el caso de los materiales sueltos, se emplean áridos de cantera tamizados o pesados (en el caso de escolleras) o piezas especiales fabricadas ex profeso para cada ensayo, a la escala correspondiente.

**G.3.5 Oleaje****Selección de parámetros de oleaje**

El dique se debe ensayar para un número determinado de estados de mar característicos, para los cuales se definen sus parámetros estadísticos medios, medios cuadráticos, picos o significantes. Para asegurar la fiabilidad estadística de los resultados, la duración mínima del ensayo no debe ser inferior a un número mínimo de olas, generalmente entre 500 y 3000. La simulación de los temporales se suele realizar fijando estados de mar de energía creciente, a partir de un perfil de temporal característico. Respecto al espectro del oleaje, se emplea comúnmente el espectro JONSWAP o Pierson-Moskowitz, caracterizados por una altura significativa ( $H_s$ ), un período de pico ( $T_p$ ) y uno o más parámetros de forma.

Al realizarse el ensayo con una profundidad de agua fija, debe tenerse en cuenta el nivel de marea, de tal manera que los estados de marea alta (mayor profundidad) afectan más a las zonas superiores de la estructuras, tales como mantos y espaldones, mientras que los estados de marea baja (menor profundidad) afectan más a la estabilidad del pie del dique.

**Generación de oleaje**

De manera general, los equipos de generación de oleaje son capaces de generar oleaje regular (monocromático) e irregular (a partir de espectros estándar o definidos por el usuario).

Es frecuente el uso de generación de oleaje de primer orden (teoría lineal). Si se precisa mayor precisión a la hora de simular el oleaje presente en la naturaleza, se puede recurrir a la generación en segundo orden.

En canal de oleaje, y en tanques equipados con sistemas multi-pala, es frecuente que el sistema de generación esté equipado con un sistema de control activo de la reflexión, de tal

manera que el movimiento de la pala se corrige para prevenir las re-reflexiones desde la pala hacia el dique. Por otro lado, al final del canal 2D o alrededor del tanque 3D se ubican absorbedores pasivos del oleaje, consistentes generalmente en un talud de grava o materiales absorbentes sintéticos, en combinación con placas perforadas.

A continuación se hace un estudio teórico de cada uno de estos factores.

#### *Disipador de oleaje*

A fin de reducir al máximo posible la reflexión que se produce en la pared opuesta a la pala, se coloca en todos los canales y tanques un disipador de oleaje.

El diseño de una rampa sin reflexión se basa en que el cambio de las propiedades de la onda al propagarse sobre un fondo de profundidad variable debe ser suficientemente suave como para que se mantenga, localmente, la hipótesis en la que se basan las teorías de onda de forma constante, que asumen fondo horizontal. Un parámetro adecuado para medir el grado de suavidad de un fondo con respecto a la onda es la relación entre el incremento de profundidad en una longitud de onda y dicha profundidad. La pendiente será suave si dicho parámetro se mantiene pequeño:

$$\delta = \frac{\Delta h_L}{h} = \frac{|h_x|L}{h} \ll 1$$

Donde  $h_x$  es la pendiente del fondo. Investigaciones teóricas de Rosseau (1952) y Yoshida (1959), sugieren que cuando el parámetro  $\delta$  anterior es del orden de la unidad, la energía reflejada será menor del 0.1%, correspondiente a un coeficiente de reflexión de alrededor del 3%.

La ecuación diferencial anterior puede ser resuelta analíticamente en profundidades reducidas, es decir, cuando  $L = T\sqrt{gh}$ , con la condición de  $h = 0$  para  $x = 0$ , obteniéndose:

$$h = \frac{\delta^2}{4T^2g}x^2 = Ax^2$$

es decir, es una parábola con tangente horizontal en  $x = 0$ ,  $h = 0$ .

Como puede verse, la parábola depende del período del oleaje, de manera que, para una profundidad de agua en el canal constante, la distancia  $x$  a la que se corta el fondo horizontal del canal aumenta al aumentar el período. Para una profundidad de agua de 0,5 m, la distancia horizontal y la profundidad de agua siguen la ley:

$$x = \frac{2T\sqrt{g}}{\delta}\sqrt{h}$$

Si la rampa es impermeable, el oleaje rompe en voluta o descrestamiento, disipándose en la rampa con una gran efectividad, debido a que la pendiente de la rampa se hace prácticamente horizontal en las proximidades del nivel medio.

Si la rampa es porosa, la disipación debida al flujo en el medio poroso hace que el asomeramiento sobre la rampa porosa sea muy inferior al asomeramiento con fondo impermeable, de manera que se produce una disminución de la altura de ola sobre la misma. Esta disminución de altura de ola por la disipación en el medio poroso puede llegar a ser tal que haga que el oleaje se disipe sin romper. Además, el fondo poroso permite aumentar el valor de  $\delta$  que determina una reflexión fija.

Otra consideración a tener en cuenta es que la disipación sobre la rampa (tanto por rotura como por disipación en el medio poroso) provoca una sobreelevación del nivel medio, máxima al final de la rampa. Por ello, el origen de la rampa debe situarse ligeramente por encima del nivel medio.

#### *Calibración del oleaje*

Si el modelo presenta una disposición o una batimetría compleja, o si es necesario conocer a priori las condiciones de oleaje frente o cerca del dique, se necesita realizar una calibración del oleaje. De esta forma, se evalúa si el sistema de generación tiene un funcionamiento adecuado, comparando los resultados obtenidos con las curvas teóricas de generación, y se analiza la aparición de otro tipo de ondas: transversales, largas y/o secundarias.

#### *Onda transversal*

Uno de los problemas que se puede presentar durante la realización de los ensayos es la generación de ondas transversales en el canal, definidas como la oscilación perpendicular al sentido de propagación como consecuencia de la existencia de paredes verticales impermeables. Su presencia se manifiesta por oscilaciones máximas y mínimas alternadas de pared a pared del canal, propagándose desde la pala. Su generación depende de las características geométricas de los canales, de la profundidad de agua que hay en el canal y del periodo del oleaje ensayado.

En el estudio de la propagación de un tren de ondas en un canal de oleaje, para un fluido incompresible y un movimiento irrotacional, el campo de velocidades y presiones se puede expresar en función de un potencial de velocidades,  $\phi$ . Definido el dominio de integración, siendo la profundidad constante en el canal, cumpliéndose la ecuación de Laplace y las condiciones de flujo nulo en el fondo y a través de las paredes laterales del canal, el potencial puede expresarse como:

$$\Phi = \frac{gA}{\sigma} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \sin(k_x x - \sigma t) \cos(k_y y)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $A$  la amplitud de la onda,  $\sigma$  la frecuencia angular,  $k$  el número de onda,  $k_x$  y  $k_y$  sus componentes según los ejes  $x$  e  $y$ , respectivamente, y  $h$  la profundidad de agua en el canal. El ancho del canal viene dado por  $2b$  y los ejes de coordenadas se sitúan:

- eje  $x$ : en el centro del canal, con sentido positivo en el sentido de avance del tren de ondas
- eje  $y$ : transversal al canal
- eje  $z$ : con origen en el nivel medio y sentido positivo hacia arriba

El flujo a través de las paredes laterales a cualquier profundidad y longitud del canal ha de ser nulo, o lo que es lo mismo, ha de cumplirse que:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right|_{|y|=b} = 0 \rightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial y} = \frac{gA}{\sigma} \sin(k_x x - \sigma t) \sin(k_y b) k_y = 0$$

Expresión que ha de ser cierta en cualquier instante de tiempo, por lo que:

$$\sin(k_y b) = 0$$

O, de igual forma:

$$k_y b = n\pi \rightarrow k_y = \frac{n\pi}{b}$$

Por otro lado, el tren de ondas en su propagación cumple la ecuación de la dispersión:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh)$$

donde:

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$

Despejando  $k_x$  y sustituyendo la expresión de la componente transversal del número de onda obtenido previamente:

$$k_x = \sqrt{k^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

Dado que, para que el tren sea propagante, el valor de  $k_x$  ha de ser real:

$$\left(\frac{\sigma^2}{g \tanh(kh)}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 > 0$$

Cuando se cumple esta condición, el tren se propaga con una componente transversal del número de onda  $k_y$ .

### *Onda larga*

Otro de los problemas asociados a la generación de oleaje en laboratorio es la aparición de ondas largas, que se definen como el conjunto de oscilaciones de la masa de agua contenida en el canal de ensayos.

La onda larga es un fenómeno que tiene lugar si la oscilación generada por una fuerza externa tiene un periodo  $T$  cercano o igual al periodo de oscilación natural del sistema (caracterizado por la configuración geométrica de la infraestructura). Se traduce en una amplificación de la amplitud de la onda estacionaria o cuasi-estacionaria desarrollada y suele ser más relevante para el caso de ondas largas (más reflexión y menos disipación en el contorno).

Puede considerarse que la onda larga en un canal de oleaje es cerrada, forzada, 3D y simple o compleja durante la generación de oleaje con absorción de reflexión. Es cerrada, libre, 3D y simple o compleja cuando se detiene la generación de oleaje.

El fenómeno en un canal de oleaje es un caso particular del que tiene lugar en un tanque de oleaje, pudiéndose considerar 2D (cuando las oscilaciones transversales son despreciables frente a las longitudinales) y de contorno simple.

Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno son las “ecuaciones del momentum” y la “ecuación de continuidad”, que resultan en un sistema en general no lineal de ecuaciones.

El medio a estudiar puede esquematizarse como se indica en la figura G.1.

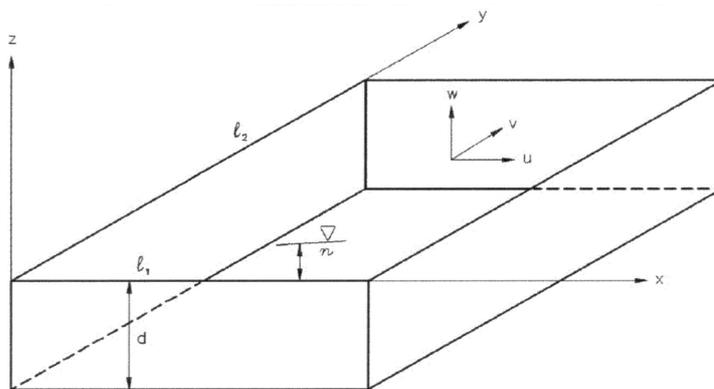


Figura G.1: Esquema de variables empleadas en el estudio de onda larga

Los periodos asociados a esta oscilación, en un tanque de oleaje de profundidad constante  $d$ , de lados  $l_x$  y  $l_y$  y con paredes totalmente reflejantes, pueden expresarse a través de la siguiente ecuación:

$$T_{n,m} = \frac{2}{\sqrt{gd}} \left[ \left( \frac{n}{l_x} \right)^2 + \left( \frac{m}{l_y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

En el caso simplificado de un canal de oleaje, donde sólo se produjera resonancia longitudinal

( $m = 0$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ ), la ecuación se reduce a:

$$T_n = \frac{2l_x}{n\sqrt{gd}}$$

### Grupos de olas

La generación del oleaje en el laboratorio es mediante el movimiento (giro, traslación o una combinación de ellas) de una pala rígida que se mueve, en general, con las características cinemáticas de la onda lineal. El campo de velocidades de las partículas de agua en contacto con la pala es el de ésta. Sin embargo, el perfil vertical de velocidades del oleaje sigue una función coseno hiperbólico. Este desajuste entre movimientos se compensa con la generación de modos evanescentes que, en general, desaparecen rápidamente (Figura G.2, (ROM 1.0-09, 2009)).

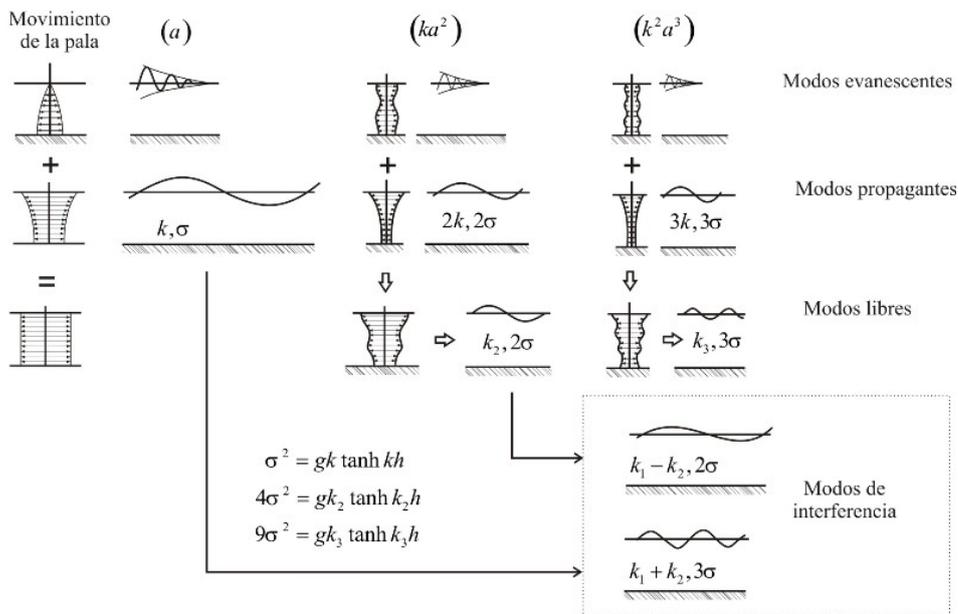


Figura G.2: Ondas generadas por una pala pistón

Además, cuando la generación se realiza en aguas intermedias y reducidas y el perfil de la onda se ajusta a una onda de Stokes II, con contenido energético en las frecuencias  $f$  y  $2f$ , se genera una onda vinculada al tren de ondas y los modos libres necesarios para compensar la falta de ajuste de la onda vinculada con el movimiento de la pala. El resultado es una onda parásita (cresta secundaria) que se propaga por el canal y que provoca una distorsión del perfil de onda, (ROM 1.0-09, 2009). Este efecto es tanto más importante cuanto mayor es el peralte de las olas generadas.

Finalmente, durante la generación de oleaje irregular en aguas someras se produce la interacción entre componentes cercanas que generan ondas largas vinculadas de frecuencia ( $f_n - f_m$ ) que pueden llegar a afectar los resultados experimentales.

Estos efectos son más importantes cuanto mayor sea la altura de ola y más no lineal sea la señal generada. Por todo ello, se recomienda que, especialmente en los casos de los oleajes más severos, la generación del tren, regular o irregular, en el laboratorio incluya un movimiento compensatorio de la señal espúrea (modos libres) que altera el perfil de los trenes, su cinemática y dinámica, o, en su defecto, se realice un análisis de su importancia en los resultados experimentales.

### G.3.6 Limitaciones

Los límites máximos de los modelos están marcados por el tamaño de las instalaciones, y los mínimos por los principios de similitud. Así, se debe asegurar un Número de Reynolds ( $Re = \sqrt{gH_s}D_n/\nu$ ) lo suficientemente grande como para asegurar las condiciones de flujo turbulento en el medio poroso del modelo. Se recomienda cumplir los siguientes valores límite:

- Profundidad de agua  $h > 5$  cm
- Altura de ola  $H > 2 - 3$  cm
- Peralte del oleaje  $H/L > 0,14 \tanh(kh)$
- Diámetro de áridos  $D_n > 3 - 5$  mm
- Lado de pieza cúbica  $D > 25$  mm

Generalmente se consideran escalas adecuadas para el estudio de la estabilidad las comprendidas entre 1:5 y 1:80, y para el estudio de las fuerzas sobre paramentos entre 1:10 y 1:50.

## G.4 Análisis de datos

El fin último de la realización de ensayos en modelo físico es la obtención de datos con los que se puedan analizar el comportamiento del dique en estudio y sus modos de fallo. Las medidas se pueden dividir en:

- Medidas de la hidrodinámica.
- Medidas del daño (pérdida de piezas, erosión, fuerzas sobre paramentos, rebase...).

Las medidas hidrodinámicas (registro de la superficie libre o de la velocidad del flujo) se pueden analizar en el dominio del tiempo (análisis estadístico) o de la frecuencia (análisis espectral). Además, es importante realizar el análisis de la separación entre oleaje incidente y reflejado, para poder evaluar el comportamiento de la interacción entre el dique y el oleaje.

### G.4.1 Análisis estadístico y espectral

El análisis estadístico permite caracterizar el oleaje a partir del registro temporal de la superficie libre. Realizando un método de pasos por cero, se obtiene un conjunto de alturas de ola y periodos de la muestra de  $N$  olas considerada, a través de la cual se definen, entre otros, los siguientes valores característicos:

- $\bar{H}$  Altura de ola media

- $H_{rms}$  Altura de ola media cuadrática
- $H_{max}$  Altura de ola máxima
- $H_s$  o  $H_{1/3}$  Altura de ola significativa
- $T_z$  Periodo medio

Por otro lado, el oleaje se puede caracterizar a través de un análisis espectral, en el que se define la energía que contiene cada componente frecuencial de la serie (espectro de energía). Para calcular los valores del espectro se utilizan las series de Fourier, pudiéndose simplificar el procedimiento mediante el empleo de la transformada rápida de Fourier (FFT).

Conocido el espectro se obtienen los parámetros espectrales asociados, que se calculan a partir de los diferentes momentos del espectro (Silva (2005)). Así, se pueden determinar, entre otros:

- $H_{m0}$  Altura de ola de momento de orden cero
- $H_{rms}$  Altura de ola media cuadrática
- $T_{01}$  Periodo medio

Tanto para el análisis estadístico como para el espectral es recomendable que el registro tenga al menos 100 olas y que el intervalo de muestre sea de una décima a una vigésima parte del periodo significativo.

#### G.4.2 Separación del oleaje incidente y reflejado

##### Ubicación de sensores para la separación entre oleaje incidente y reflejado

La separación entre oleaje incidente y reflejado puede realizarse siguiendo varios métodos. En estas recomendaciones se recomienda el empleo del Método de Baquerizo (Baquerizo (1995)). Para su empleo, se necesita colocar un grupo de tres sensores de nivel delante de la sección, aunque no muy cerca de ésta para que no se vean afectados por la interacción entre el oleaje y el dique.

La separación entre dichos sensores ha de cumplir ciertas restricciones que dependen del periodo del oleaje ensayado. Debido a esto la separación entre sensores puede no ser constante a lo largo de todo el ensayo. En el caso de laboratorio con fondo variable, se recomienda colocar grupos de tres sensores en cada profundidad.

Para los ensayos en tanque de oleaje, con incidencia oblicua, se deberán disponer los sensores en estrella (véase Figura G.3).

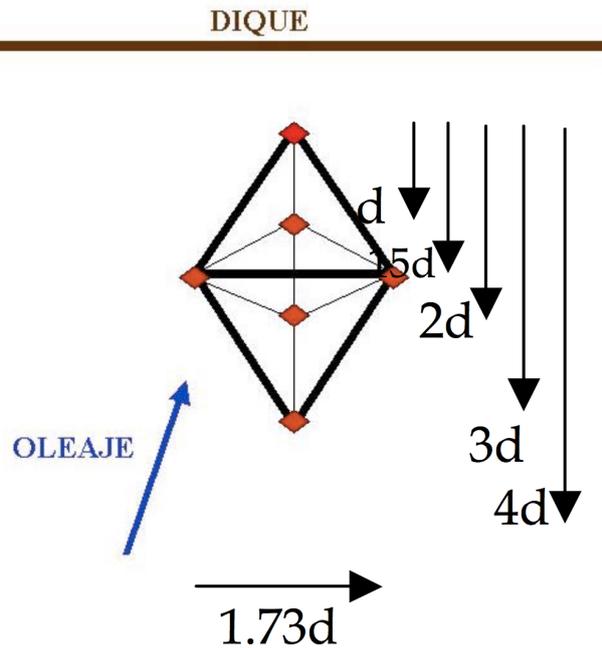


Figura G.3: Disposición en estrella para separación de oleaje incidente y reflejado en ensayos con incidencia oblicua

### Análisis de la reflexión

El análisis de la reflexión se realiza aplicando el Método de Baquerizo previamente citado. El método proporciona las amplitudes complejas de las series incidente y reflejada:  $\overline{z}_I^j$  y  $\overline{z}_R^j$ . La evaluación del cociente entre ambas amplitudes proporciona un número complejo,  $K_R(f)$ , que contiene:

- el módulo del coeficiente de reflexión,  $K_R$ , dado por:

$$K_R = \frac{\sqrt{\left| \overline{z}_I^j \right|^2}}{\sqrt{\left| \overline{z}_R^j \right|^2}} \quad (\text{G.2})$$

- la fase de la reflexión,  $\phi_R$ , de valor:

$$\phi_R = \text{arg} \left( \frac{\left| \overline{z}_I^j \right|}{\left| \overline{z}_R^j \right|} \right) \quad (\text{G.3})$$

Finalmente, sumando las series temporales incidente y reflejada, y regenerando la serie total se comprueba la bondad del método de separación.

Tras este análisis, se obtienen los siguientes resultados:

- Altura de ola total registrada en los sensores  $H_t$
- Altura de ola incidente  $H_I$
- Altura de ola reflejada  $H_R$
- Coeficiente de reflexión: módulo  $K_R$  y fase  $\phi_R$

### G.4.3 Análisis del daño

La medida del daño en diques granulares se realiza mediante métodos visuales o bien a partir de perfiladores (mecánicos, acústicos, láser) o bien mediante el uso de técnicas de análisis de imagen.

#### *Medida visual y fotográfica*

Para realizar la medida visual se recomienda pintar las piezas de distintos colores. Para que quede constancia de los datos de piezas desplazadas en cada ensayo se realizan fotografías del talud a lo largo del ensayo. El modo más sencillo de que las fotografías realizadas en los distintos ensayos sirvan como elemento objetivo de medida del daño es que aparezca en todas las imágenes un rectángulo de referencia que permita conocer la escala de la fotografía. De esta forma se puede obtener, por contraste entre los colores de las dos capas de manto, el área de daño en cada fotografía, y las distintas fotografías pueden ser ampliadas o reducidas de modo que sean comparables entre sí.

La fotografía se realiza de forma perpendicular al talud, y centrada en el rectángulo de referencia, para que el rectángulo no aparezca deformado en la imagen. La distancia focal es motivo de que el área de la imagen sufra deformaciones. Sin embargo, para fotografías de objetos situados sensiblemente en el mismo plano y distancias focales que no estén por debajo de los 35 mm, la distorsión es despreciable, por lo que se usa un objetivo con una distancia focal superior a los 35 mm.

Para una cámara reflex tradicional con película de 35 mm (el formato habitual de película), la mínima distancia necesaria de la cámara al plano del manto principal es:

$$\frac{f}{35} b$$

siendo  $b$  la anchura del rectángulo de referencia y  $f$  la distancia focal en milímetros.

El rectángulo de referencia comprende la zona limitada por las cotas  $\pm 1,5H$  referidas al nivel medio en reposo, siendo  $H$  la altura de ola de inicio de avería. Esto corresponde a una altura del rectángulo de:

$$a = \frac{3H}{\sin \alpha}$$

siendo  $cotga$  el talud del manto principal. Dado que la película de 35 mm tiene una relación anchura-altura de 1,5, que es la que suelen tener las cámaras digitales, se obtiene la anchura del rectángulo:

$$b = 1,5a$$

El rectángulo debe estar apoyado directamente sobre el talud y centrado en el nivel de agua en reposo. Este rectángulo puede ser de mayores dimensiones, siempre y cuando se le realicen marcas de referencia en todos los lados, mostrando las mencionadas altura y anchura de referencia, de modo que aparezcan en la imagen las escalas horizontal y vertical. Dichas marcas deben ser equidistantes del punto central en cada lado.

#### *Medida con perfilador*

Algunos laboratorios disponen de perfiladores con los que se mide el perfil de la sección cuando ha habido desplazamiento de piezas. Los perfiladores pueden ser acústicos, láser o mecánicos.

En todos los casos, el análisis del daño de los modos de fallo (erosión del lecho, pérdida de piezas de berma y talud, rebase, etcétera) debe incluir un método de evolución del daño siguiendo el modelo potencial propuesto por Castillo y col. (2012), tal y como se describe en el *Articulado*, apartado 2.4.

## Referencias

- Baquerizo, A. (1995). “Reflexión del oleaje en playas. Métodos de evaluación y de predicción.” Tesis doctoral. Universidad de Cantabria (véase página 121).
- Benedicto, M. I. y Losada, M. A. (2002). *Influencia de la reflexión en la estabilidad y rebase de los diques en talud*. Informe técnico. Puertos del Estado (véase página 105).
- Castillo, M., Castillo, E., Fernandez-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 (véase página 124).
- Frostick, L. E., McLelland, S. J. y Mercer, T. G. (2011). *Users guide to physical modelling and experimentation: Experience of the HYDRALAB network*. CRC Press (véase página 105).
- Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Volumen 7. World Scientific (véase página 105).
- Pérez, D. (2008). “Procesos hidrodinámicos en diques mixtos y efectos de escala”. Tesis doctoral. Universidad de Granada (véase página 109).
- 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 (véase página 119).

Silva, R. (2005). *Análisis y descripción estadística del oleaje*. Universidad Nacional Autónoma de México (véase página 121).