

III. Proyecto y Cálculo

ESTUDIOS EXPERIMENTALES EN EL PROYECTO Y LA REGENERACIÓN DE PLAYAS

José M^a. Berenguer
CEPYC – CEDES

ENSAYOS EN MODELO FÍSICO PARA INGENIERÍA DE COSTAS

Los modelos físicos a escala, también conocidos como modelos reducidos, son indudablemente una potente herramienta para el estudio de un gran número de fenómenos relacionados con los procesos y obras de ingeniería de costas. La información que proporcionan los modelos reducidos es enormemente útil y fiable, siempre y cuando los ensayos se desarrollen en las condiciones adecuadas, minimizando los efectos de escala, y las medidas se lleven a cabo con el cuidado que exige todo proceso de este tipo.

El uso de modelos reducidos aporta al proyectista una información muy valiosa a la hora del diseño, y siempre a un coste drásticamente inferior al de la obra en cuestión. En un campo, como es el del oleaje, dependiente de gran cantidad de parámetros, y por tanto muy difícil de modelizar y reducir a fórmulas precisas, el ensayo en modelo físico resulta ser una técnica eficaz para la resolución de muchos problemas presentes en el diseño de una obra marítima.

En el campo de la Ingeniería de Costas, los principales problemas que pueden abordarse mediante el uso de ensayos en modelo son:

- Agitación debida al oleaje: Medida de la penetración del oleaje en dársenas o zonas costeras, analizando la influencia de la dirección del temporal y las características espectrales. Disposición en planta de obras de protección. Estudio de soluciones estructurales.
- Estructuras de protección costera: (Diques en talud o monolíticos, espigones, islas, arrecifes, plataformas, pantallas, diques flotantes, etc.).

Diseño de la sección y elementos estructurales. Esfuerzos debidos al oleaje. Comportamiento hidrodinámico (reflexión, transmisión, remonte, rebase). Elementos de fondeo y anclaje. Fases constructivas.

- Estructuras en talud: Diseño de la sección y elementos estructurales. Características reflejantes. Remonte y rebase del oleaje.
- Estructuras con paramento vertical: Diseño de la sección (cajones y espaldones). Esfuerzos debidos al oleaje. Remonte y rebase.
- Diques flotantes: Diseño estructural. Eficacia frente a la transmisión y reflexión del oleaje.
- Diques hidráulicos y neumáticos: Diseño estructural y dimensionamiento de dispositivos hidráulicos y neumáticos. Eficacia frente a la transmisión y reflexión del oleaje.
- Estuarios: Dimensionamiento de canales, aterramientos en canales de navegación, erosión y sedimentación en zonas intermareales, cambios de régimen de corrientes por efecto de obras, contaminación, influencia de nuevos muelles y espigones en las condiciones físicas y de explotación, etc.
- Zona litoral: Análisis del transporte litoral bajo la acción del oleaje y las corrientes. Influencia de estructuras costeras. Erosión y regeneración de playas.

A continuación se describen las técnicas utilizadas para la generación de oleaje en modelo reducido y se analizan con detalle los ensayos más frecuentes.

MODELOS REDUCIDOS. FUNDAMENTO TEÓRICO

La modelización matemática presenta en muchos casos importantes dificultades a la hora de plantear y resolver las ecuaciones que rigen determinados fenómenos físicos de forma correcta y completa. Ello puede deberse bien a la complejidad de la formulación, bien al conocimiento incompleto del fenómeno o incluso a la existencia de condiciones de contorno múltiples y difíciles de formular. Por ello, es necesario recurrir a simplificaciones que solamente serán válidas en ciertas situaciones esquematizadas, completando los conocimientos adquiridos mediante el uso de modelos a escala. Estos últimos son también útiles como base de verificación experimental de los modelos matemáticos y por sí solos constituyen una interesante herramienta de investigación.

En cualquier caso, es necesario establecer las líneas teóricas que sustentan el uso de modelos reducidos y tener en cuenta las limitaciones en su aplicación, a fin de disponer de criterios claros sobre la validez de los resultados y las posibilidades de extrapolación.

Principio de semejanza

El **principio de semejanza** es un concepto abstracto basado en el principio de homogeneidad. Para una teoría física dada, este principio permite deducir las condiciones a las cuales deben sujetarse dos procesos para que la relación entre las medidas de sus magnitudes homologas sea constante. Es decir, se consideran dos sistemas físicos (en nuestro caso, el **modelo a escala** y el sistema real o prototipo) que presentan comportamientos semejantes en relación a determinados fenómenos. Así pues, aunque con ciertas limitaciones, las medidas efectuadas sobre algunas magnitudes físicas en el modelo permiten anticipar el comportamiento del sistema real, mediante un proceso denominado **extrapolación modelo-prototipo**.

Para que los resultados obtenidos en un modelo a escala puedan ser tomados como representativos de la realidad, aquél debe cumplir ciertas leyes de semejanza. Se consideran tres tipos de semejanza:

- **Semejanza geométrica:** Permite relacionar las dimensiones del modelo con las del prototipo a través de una o varias transformaciones geométricas.
- **Semejanza cinemática:** Añadiendo a las relaciones geométricas una escala de tiempos, permite relacionar las velocidades y aceleraciones de modelo y prototipo.
- **Semejanza dinámica:** Presupone las anteriores y añade las escalas de fuerzas existentes en el fenómeno objeto de estudio.

La semejanza geométrica entre dos objetos se da cuando la relación entre dos líneas homologas cualesquiera es

constante:

$$e_L = L_p/L_m$$

siendo e_L la escala de longitudes y L_p y L_m longitudes homologas en prototipo (p) y modelo (m), respectivamente.

Fácilmente pueden deducirse las escalas de superficies (e_s) y de volúmenes (e_v), considerando estas magnitudes como producto de dos y tres longitudes, respectivamente:

$$e_s = S_p/S_m = L_{p1} * L_{p2} / L_{m1} * L_{m2} = e_L^2$$

$$e_v = V_p/V_m = L_{p1} * L_{p2} * L_{p3} / L_{m1} * L_{m2} * L_{m3} = e_L^3$$

La semejanza cinemática presupone la semejanza geométrica y establece la similitud entre los movimientos en modelo y prototipo. Para ello, es necesario definir una escala de tiempos,

$$e_t = t_p/t_m$$

Las trayectorias de las partículas homologas serán semejantes debido a la semejanza geométrica, por lo que los movimientos serán también semejantes una vez obtenida la relación de velocidades y aceleraciones:

$$e_v = v_p/v_m = (L_p/t_p)/(L_m/t_m) = e_L/e_t$$

$$e_a = a_p/a_m = (v_p/t_p)/(v_m/t_m) = e_L/e_t^2$$

Las escalas e_v y e_a , de velocidades y aceleraciones, permiten extrapolar los movimientos del modelo al prototipo.

La semejanza dinámica implica una relación constante entre las masas de partículas o elementos homólogos:

$$e_M = M_p/M_m$$

siendo e_M la escala de masas M_p y M_m las masas de elementos homólogos en prototipo y modelo. Inmediatamente se deduce una escala de densidades e_p :

$$e_p = \rho_p/\rho_m = (M_{p1}V_p)/(M_m/V_m) = e_M/e_L^3$$

Por tanto, para establecer la semejanza dinámica se requiere la definición de tres escalas fundamentales e_L , e_t y e_M , que relacionan las longitudes, tiempos y masas en el modelo y el prototipo. Es más habitual, sin embargo, establecer una escala de fuerzas que sustituye a la escala de masas:

$$e_F = F_p/F_m = (M_p * a_p)/(M_m * a_m) = e_M * e_L/e_t^2$$

De modo análogo, pueden establecerse las relaciones de semejanza de otras magnitudes físicas (momento, potencia, energía, etc.).

Modelos hidráulicos

En los problemas de **mecánica de fluidos** que se presentan en los estudios de obras costeras y portuarias, las principales fuerzas a considerar son:

- Fuerzas de inercia F_I
- Fuerzas de gravedad F_g
- Fuerzas de viscosidad F_μ
- Tensión superficial F_σ
- Fuerzas de elasticidad F_c
- Fuerzas de presión F_p

La segunda Ley de Newton establece que el vector suma de fuerzas exteriores a un elemento es igual a la reacción de la masa del elemento contra ellas:

$$F_r = F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p$$

Por tanto, en la semejanza entre modelo y prototipo debería cumplirse la relación:

$$(F_i)_p / (F_i)_m = (F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p)_p / (F_g + F_\mu + F_\sigma + F_e + F_p)_m$$

o también

$$(F_i)_p / (F_i)_m = (F_g)_p / (F_g)_m = (F_\mu)_p / (F_\mu)_m = (F_\sigma)_p / (F_\sigma)_m = (F_e)_p / (F_e)_m = (F_p)_p / (F_p)_m$$

Esto es, para obtener un comportamiento del modelo idéntico al real, la relación entre fuerzas homologas ha de ser constante. Las fuerzas de inercia, lógicamente, deben tenerse en cuenta en cualquier caso. La relación entre fuerzas de presión se deja normalmente como variable dependiente, pues no se suele utilizar en la determinación de la escala de los ensayos. En cuanto al resto de las fuerzas, se presenta el problema de la inexistencia de un fluido que verifique simultáneamente las igualdades

$$(F_\mu)_p / (F_\mu)_m = (F_\sigma)_p / (F_\sigma)_m = (F_e)_p / (F_e)_m$$

salvo que el modelo sea igual al prototipo, es decir, en un ensayo a escala real.

En consecuencia, no es posible obtener semejanza total entre modelo y prototipo, por las características de los fluidos utilizados (no reproducibles a escala) y por trabajar bajo la acción de la gravedad (que lógicamente no mantiene la escala, sino que es la misma para modelo y prototipo). Por ello, se recurre a emplear semejanzas parciales, en las que se reproduzcan adecuadamente las fuerzas **dominantes** en el fenómeno objeto de estudio, admitiendo una cierta desviación en las secundarias (**efectos de escala**).

* Fuerzas de gravedad: Si predomina este tipo de fuerzas, lo que es habitual en la mayoría de los ensayos, y especialmente en lo que se refiere a oleaje, se tendrá:

$$(F_i)_p / (F_i)_m = (F_g)_p / (F_g)_m$$

es decir,

$$(F_i)_p / (F_g)_p = (F_i)_m / (F_g)_m = M^*_a / M^*_g = V/T/g = V^2/gL$$

o lo que es lo mismo,

$$V^2_m / g_m L_m = V^2_p / g_p L_p$$

siendo V = velocidad típica del fenómeno

g = aceleración de la gravedad

L = longitud típica del fenómeno

La raíz cuadrada de esta relación se conoce como Número de Froude (Fn) y su constancia en modelo y prototipo constituye la Ley de Semejanza de Froude:

Número de Froude $Fn = V / \sqrt{gL}$

Semejanza de Froude $En_m = Fn_p$

* Fuerzas de viscosidad: Si son estas fuerzas las predominantes, se tendrá:

$$(F_i)_p / (F_i)_m = (F_\mu)_p / (F_\mu)_m$$

ed decir,

$$(F_i)_p / (F_\mu)_p = (F_i)_m / (F_\mu)_m = \rho L^3 a / \mu L V = VL / (\mu / \rho)$$

o lo que es lo mismo,

$$V_m L_m / \eta_m = V_p L_p / \eta_p$$

siendo V = velocidad típica del fenómeno

L = longitud típica del fenómeno

μ = viscosidad dinámica

η = viscosidad cinemática

ρ = densidad

De nuevo, se definen un número adimensional y una ley de semejanza:

Número de Reynold $Re = VL / \eta$

Semejanza de Reynold $Re_m = Re_p$

Semejanza de Froude

Esta Ley de Semejanza se analiza con mayor detalle puesto que es la más utilizada en los modelos hidráulicos. El motivo es que en fenómenos como el oleaje predominan las fuerzas de gravedad, aunque habrá que tener en cuenta las limitaciones existentes cuando hay otros fenómenos involucrados (fricción por corrientes, turbulencia, rotura del oleaje, etc.).

Siendo λ la escala geométrica del modelo ($L_p = \lambda * L_m$), y puesto que se mantiene la gravedad ($g_p/g_m = 1$), al aplicar la ley de semejanza se obtienen las escalas correspondientes a otras magnitudes físicas de interés:

Velocidad	$V_p = \sqrt{\lambda} * V_m$
Tiempo	$T_p = \sqrt{\lambda} * T_m$
Frecuencia	$f_p = 1/\sqrt{\lambda} * f_m$
Angulos	$a_p = a_m$
Fuerza	$F_p = \lambda^3 * F_m$

Por ejemplo, para una escala 1:100 ($\lambda = 100$), resulta:

Velocidad	$V_p = 10.0 * V_m$
Tiempo	$T_p = 10.0 * T_m$
Frecuencia	$f_p = 0.1 * f_m$
Angulos	$\alpha_p = \alpha_m$
Fuerzas	$F_p = 10^6 * F_m$

Se hace notar que el tiempo transcurre “más rápidamente” en el modelo que en la realidad, y que los movimientos de las partículas son “más lentos”. Asimismo, es importante destacar que las fuerzas se reducen de forma muy importante con la escala (1 tonelada a escala 1:100 se convierte en 1 gramo), por lo que la medida de esta magnitud debe acometerse con gran precisión.

De forma análoga puede calcularse la relación entre los números de Reynolds, supuesto que se mantiene el número de Froude y se utiliza el mismo fluido en los dos casos:

$$Re_p/Re_m = (V_p L_p / \eta_p) / (V_m L_m / \eta_m) = V_p / V_m * L_p / L_m$$

$$Re_p/Re_m = \lambda^{3/2}$$

Se considera $\eta_p = \eta_m$, salvando las diferencias debidas a la salinidad del agua y la temperatura. En el caso de un modelo a escala 1:100, se tendría

$$Re_p/Re_m = 100^{3/2} = 1000$$

Esto es, el Número de Reynolds del modelo sería 1000 veces menor que el del prototipo, lo que quiere decir que debería utilizarse un fluido 1000 veces menos viscoso que el agua para reproducir el comportamiento real, lo que es impracticable. Si se utiliza agua, el modelo reproducirá mal el límite entre régimen laminar (Reynolds bajo) y régimen turbulento (Reynolds alto), tendiendo a presentar menor turbulencia.

Efectos de escala

Como se ha indicado, no es posible establecer una total similitud entre modelo y prototipo, por lo que el grado de correspondencia entre ambos encuentra ciertas

limitaciones. 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. Esto sólo sería posible aplicando escalas muy grandes, próximas a la escala natural, con los problemas de economía y explotación del modelo que ello supondría. Los efectos de escala, definidos como las desviaciones entre el comportamiento del modelo a escala y el del prototipo, son por tanto inevitables.

Sin embargo, una vez establecidas las leyes de semejanza y con un conocimiento suficiente de los fenómenos, pueden seleccionarse aquéllos que sean preponderantes y despreciar la influencia de los secundarios en las condiciones en que sea posible. Si es necesario contar con resultados muy precisos, la alternativa es cuantificar la influencia de los efectos de escala y corregirlos en el proceso de extrapolación a prototipo.

Como se ha indicado, en la mayoría de los modelos se emplea la semejanza de Froude, basada en la preponderancia de las fuerzas de gravedad. El fundamento de este hecho es que el oleaje, la acción exterior más frecuente, es un fenómeno esencialmente gravitatorio.

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 (corrientes sobre estructuras, buques en movimiento, amortiguamientos, fuerzas de arrastre del oleaje sobre elementos estructurales de diques, etc.). En ocasiones, la situación puede mejorarse añadiendo estimuladores de turbulencia (incremento de la rugosidad del fondo o el casco de buques, etc.), pero en general, la solución pasa por utilizar una escala suficientemente grande.

En lo que se refiere a las fuerzas de tensión superficial, rara vez sus efectos de escala son tenidos en cuenta en problemas de ingeniería de puertos y costas. En todo caso, debe acotarse la zona en que los fenómenos de capilaridad falsean el normal desarrollo de la propagación del oleaje. La zona válida será aquella en la que la velocidad de propagación de las perturbaciones de peso sea muy superior a la de los fenómenos de superficie. Como indicación, para una escala 1:150, la profundidad mínima en que puede despreciarse la influencia de la capilaridad es de unos 3 mm (unos 5 mm en prototipo). Así pues, habría de tenerse especial cuidado 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.

Las fuerzas elásticas son importantes, por ejemplo, en problemas de impacto del oleaje sobre estructuras. En este caso, debe acudirse a escalas grandes a fin de evitar fuerzas excesivas en el modelo. La forma de impacto del oleaje y la rotura influyen también de manera determinante, por lo que cada condición de oleaje debe analizarse de manera particular.

GENERACIÓN DE OLAJE

El oleaje será, en la mayoría de los casos, la sollicitación dominante en el diseño de estructura costera o en el análisis de sus condiciones de trabajo. Ello no quita que, en ocasiones, sean también las corrientes, la marea o el viento factores importantes a considerar. Sin embargo, la especial dificultad para reproducir adecuadamente este fenómeno natural ha dado lugar a que la mayor parte de los esfuerzos se vuelquen en obtener en los modelos reducidos oleaje que se ajuste de forma suficiente a la realidad.

Dependiendo del tipo de ensayo, se empleará oleaje correspondiente al régimen medio (ensayos de determinación de condiciones de explotación) o extrema! (ensayos de prediseño de obras o instalaciones).

Existen varias técnicas para reproducir oleaje en modelo, cada una de las cuales comporta ventajas e inconvenientes:

* Oleaje regular (monocromático):

En el modelo se genera oleaje con un único período (T) y altura constante (H) en una sola dirección. Requiere equipos de generación sencillos, pero simplifica en exceso el oleaje natural, que nunca presenta estas características. Por otra parte, es complicado seleccionar qué parámetros (H, T) representan al oleaje real, que incluye una gran variedad de períodos y alturas. Igualmente, es difícil interpretar los resultados obtenidos en el ensayo, que pueden tanto sobrevalorar como minusvalorar la acción del oleaje real, según el caso. En la actualidad, se utiliza solamente en ensayos muy específicos (capacidad reflejante de elementos, fuerzas de impacto, ensayos básicos de estabilidad, etc.).

* Oleaje irregular (aleatorio, espectral):

Se genera oleaje con un espectro de potencia semejante al real, habitualmente aproximado mediante la formulación Pierson-Moskowitz o JONSWAP. Este vendrá caracterizado por una altura significativa (H_s), un período de pico (T_p) y uno o más parámetros de forma (γ en el caso del espectro JONSWAP). Requiere maquinaria de generación más compleja y cara, pero el resultado se aproxima más a la realidad. Igualmente, es

necesario contar con métodos numéricos de ajuste de espectros tipo a señales reales y de síntesis de señal por suma aleatoria o filtrado, así como determinar criterios más completos de selección de parámetros. Se complican también los métodos de análisis de resultados. En cualquier caso, se utiliza una única dirección de oleaje, por lo que las olas tienen frentes de longitud igual a la anchura del equipo de generación (cresta larga). Es el sistema de generación más utilizado hoy en día en la mayoría de los laboratorios mundiales.

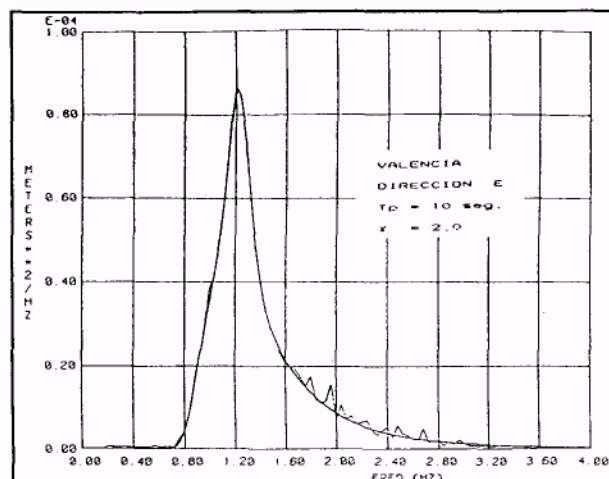


Figura 1. Espectros teórico (JONSWAP) y obtenido en el modelo (Puerto de Valencia)

Oleaje direccional

Pretende reproducir el oleaje real, cuya energía se distribuye no sólo en un cierto margen de frecuencias, sino también en un determinado rango de direcciones, materializadas en un factor de dispersión ("spreading"). Se tiene, por tanto, un espectro tridimensional $S_{f\alpha} = S(f, \alpha)$, siendo S la densidad espectral (energía unitaria de una banda de frecuencias en una dirección determinada), f la frecuencia y α la dirección de propagación. Las olas así generadas, llamadas olas de cresta corta o mar complejo, son resultado de la superposición de trenes de olas de diferentes frecuencias (según un espectro JONSWAP) y direcciones variables alrededor de una central con una cierta función de dispersión (habitualmente proporcional a $\cos^2(\alpha - \alpha_0)$, siendo α_0 la dirección principal). En este caso, el resultado del ensayo puede ser muy aproximado a la realidad. Ahora bien, la complejidad de los métodos de generación y medida crece de forma muy importante. La información de entrada es escasa y difícil de seleccionar, ya que existen todavía pocas medidas fiables de oleaje direccional. Sobre todo, el inconveniente principal es el coste de las instalaciones de generación, que puede ser de 10 a 50 veces superior al del escalón anterior.

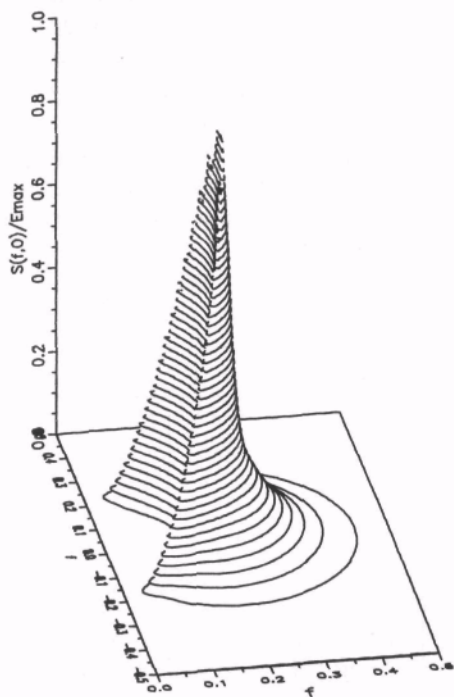


Figura 2. Espectro de oleaje direccional

Sin embargo, gran cantidad de fenómenos (propagación del oleaje, agitación interior, respuesta de sistemas fondeados, etc.) son muy sensibles a la dispersión direccional, por lo que el desarrollo de estos sistemas está en auge y la mayoría de los laboratorios de hidráulica se están dotando de ellos.

La señal de oleaje se sintetiza mediante ordenador, ya sea por suma aleatoria de señales monocromáticas o por filtrado de ruido blanco. Se envía directamente a los elementos de generación o se graba en cinta magnética, lo que permite su uso repetido a lo largo de los ensayos. La instalación típica constará de ordenador, magnetófono, amplificador, unidad de control (encargada de la regulación de la señal) y una máquina generadora de oleaje.

La maquinaria utilizada consiste habitualmente en una o más paletas (chapas metálicas colocadas en posición vertical) soportadas en una estructura metálica y movidas en el agua mediante un actuador. Existen dos tipos de paletas:

- **Paletas de traslación (“pistón type”):** El actuador da lugar a un movimiento de traslación horizontal de la paleta, lo que produce en las partículas de agua distribuciones de velocidad semejantes a las del oleaje en aguas poco profundas.
- **Paletas de rotación (“flap type”):** La paleta está fijada en su base a un eje horizontal y bajo la acción del actuador mueve su extremo superior adelante y atrás. En este caso, se obtienen menores alturas de ola para el mismo desplazamiento de la paleta, pero las velocidades de las partículas son más semejantes a las existentes en el oleaje en aguas profundas.

En los actuadores, elementos que mueven las paletas, se emplean los siguientes sistemas:

- **Actuadores mecánicos :** El movimiento es producido generalmente mediante un motor eléctrico, y se transmite a la paleta por medio de engranajes, embragues o sistemas biela-manivela, lo que permite ajustar el período y recorrido de la paleta. Hoy en día están prácticamente en desuso, y sólo son adecuados para oleaje regular.
- **Actuadores hidráulicos :** Constan de un compresor que proporciona presión al circuito hidráulico de aceite. Una servoválvula regula el flujo de aceite a un pistón de doble cara, que produce el movimiento alternativo de la paleta. Su ventaja principal es la magnífica capacidad de regulación del movimiento, dada la alta calidad de las servoválvulas existentes. Para altas potencias es el sistema más recomendable.
- **Actuadores eléctricos :** En este caso, un motor eléctrico actúa sobre un tornillo sin fin produciendo el movimiento alternativo de la paleta. Están experimentando un gran desarrollo, aunque tienen ciertas limitaciones en su capacidad de respuesta.
- **Actuadores electromagnéticos :** No están totalmente desarrollados, pero son muy prometedores. Consisten en el desplazamiento de un núcleo de hierro ligado a la paleta dentro de una bobina alimentada con tensión variable. Sus mayores ventajas son una gran capacidad de respuesta, alta linealidad, coste razonable, bajo mantenimiento y escaso ruido.

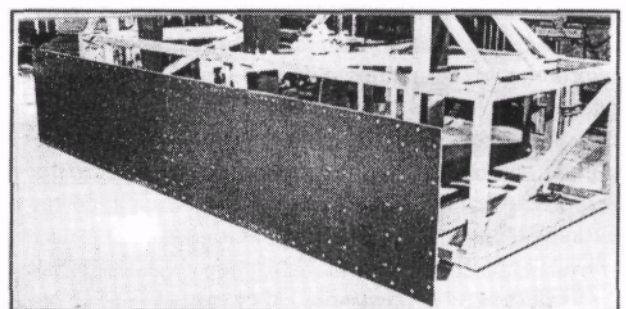


Figura 3. Paleta generadora de oleaje unidireccional (HR Wallingford)

Para generadores de oleaje regular o espectral unidireccional se utiliza normalmente una sola chapa de acero o aluminio, de entre 1 y 10 m de anchura, dotada de un actuador. Para los generadores de oleaje multidireccional ha de emplearse un gran número de paletas de menor anchura, cada una de ellas dotada de

su actuador individual, lo que multiplica enormemente el coste. La anchura de cada paleta determina la resolución direccional del equipo, mientras que el recorrido horizontal limita la altura de ola (ligada también a la profundidad de generación).

La figura siguiente muestra una vista general del tanque para ensayos con oleaje multidireccional existente en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX. En este tanque se dispone, además, de equipos para generación de corriente transversal.

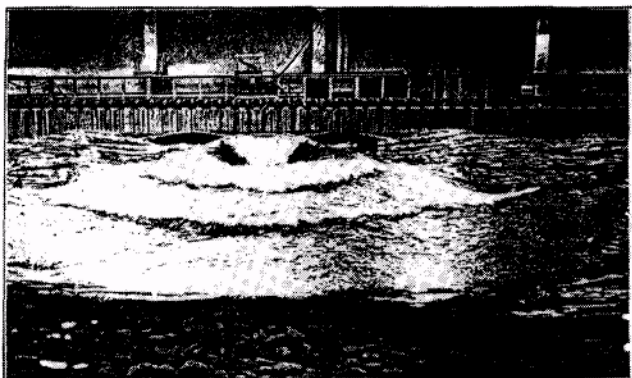


Figura 4. Tanque de ensayos con oleaje multidireccional (CEPYC-CEDEX)

ENSAYOS DE AGITACION

Objetivos

La finalidad de este tipo de ensayos es analizar las condiciones de propagación y penetración del oleaje en una determinada zona de la costa o en un puerto. Los resultados de los ensayos permiten, entre otras aplicaciones:

- Valorar alternativas de trazado en planta en una obra portuaria o de defensa de costas. Valorar alternativas estructurales.
- Analizar condiciones de navegación de canales de acceso a puerto y zonas de maniobra.
- Definir las características del oleaje (direcciones de propagación, alturas, períodos) en una zona de costa, con vistas a su aplicación en el análisis de procesos litorales.

Para la realización de los ensayos se requieren normalmente estudios previos tanto de clima marítimo, que definen las direcciones típicas del oleaje junto con sus distribuciones de alturas y períodos, como de propagación del oleaje desde aguas profundas hasta la zona de interés.

Análisis de escalas

Por su tamaño y profundidad, los puertos pueden normalmente representarse mediante modelos sin distorsión de escalas, es decir, con la misma escala en las dimensiones horizontales y verticales. Los períodos del oleaje (2-5 s. para muy corto "fetch", 5-10 s. para temporales localizados y 10-20 s. para temporales generados a gran distancia) permiten igualmente evitar la distorsión vertical. Este hecho simplifica el diseño del modelo y facilita la explotación de los resultados.

Como se indicó en el punto 1, las fuerzas predominantes en los fenómenos del oleaje son las gravitatorias, mientras las debidas a la viscosidad y a la tensión superficial son despreciables frente a éstas. Por ello, lo más frecuente es la aplicación de la Semejanza de Froude.

La escala lineal se selecciona en función de las dimensiones de la zona a estudiar, del espacio disponible en las instalaciones de ensayo y la capacidad de los equipos de generación y medida de oleaje. Habitualmente, se utiliza un rango de escalas que va desde 1:75 para modelos de puertos deportivos o pesqueros hasta 1:200 para grandes puertos comerciales. Una vez que se fija la escala, debe analizarse la magnitud de los efectos de escala en las fuerzas viscosas y de capilaridad. En su caso, se incrementaría la escala o se recurriría a utilizar modelos con distorsión. El objetivo principal en estos casos es corregir el comportamiento del modelo en áreas de profundidad limitada. La extrapolación habitual es directa, pero se circunscribe a las zonas del modelo no afectadas por efectos de escala.

Los efectos de escala más importantes se refieren a la tensión superficial en zonas de muy baja profundidad (ondas capilares), a la pérdida de altura de ola por fricción interna y fricción con el fondo y a la alteración de las características reflejantes de las estructuras portuarias. La defensa contra estas distorsiones se centra, respectivamente, en despreciar los resultados del modelo en zonas de muy reducida profundidad, en limitar el período mínimo de oleaje y en ajustar los coeficientes de reflexión de taludes y paramentos especiales por medio de ensayos auxiliares a mayor escala.

Construcción del modelo

La definición de las dimensiones del modelo se decide, una vez seleccionada la escala, teniendo en cuenta la zona objeto de estudio y la superficie adicional necesaria para la colocación de las paletas generadoras de oleaje y el desarrollo de éste. En este sentido, son limitaciones importantes la superficie disponible en la instalación de ensayos (habitualmente una nave cubierta) y la capacidad de los equipos de generación y medida de oleaje.

Para permitir el total desarrollo del oleaje, las paletas deben situarse alejadas al menos unas 4 o 5 longitudes de onda de la zona de medida. El oleaje se conduce desde la paleta a la zona de medida mediante el uso de pantallas de encauzamiento colocadas perpendicularmente a los frentes de ola, para mantener la dirección original de propagación y evitar las pérdidas por expansión lateral.

La construcción de los modelos tridimensionales se lleva a cabo utilizando la técnica de los alambres. Es decir, las batimétricas se reproducen con alambre de acero, y se fijan soldándolas sobre varillas verticales de longitud correspondiente a la profundidad en cuestión. Posteriormente, se rellena la zona inferior con grava hasta una pequeña distancia de la superficie, disponiendo una capa de mortero de cemento en los últimos 5 cm. Una vez alisada, reproducirá la geometría del fondo, debiendo conseguirse un buen acabado para reducir al mínimo la fricción.

Las estructuras existentes en la zona (espigones, diques, dársenas, etc.) se reproducen con diferentes materiales y métodos de construcción. Habitualmente se utilizan bloques o piedras de pesos y dimensiones calibradas para los diques, y los muelles se construyen con ladrillos y cemento. En determinados casos se disponen elementos desmontables para reducir el tiempo y coste de construcción (espaldones, muelles claraboya, rampas y varaderos, etc.).

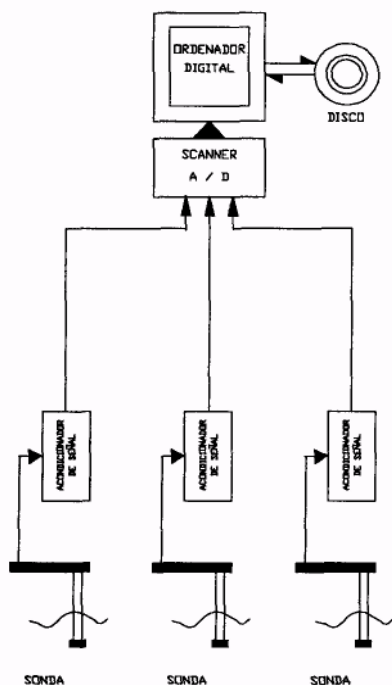


Figura 5. Adquisición y registro de datos de oleaje

Un hecho decisivo en la técnica de modelos es la adecuada calibración de las reflexiones, que tienen lugar en condiciones diferentes a las de prototipo. Por ello, es necesario disponer elementos antirreflejantes en los límites del modelo, que permitan una correcta

reproducción de los fenómenos de propagación del oleaje. Estos consistirán habitualmente en mantas de fibra de coco, playas de gravilla muy tendidas, etc. Hay que tener en cuenta, además, que las ondas largas tienen condiciones de propagación diferentes a las del oleaje, siendo muy difícil controlar sus reflexiones, que se verán mucho menos amortiguadas.

Instrumentación

Para medir la altura de ola se utilizan sondas que registran de forma continua las variaciones del nivel del agua. Existen dos tipos principales de sondas para medida de oleaje:

- **Sondas de resistencia** : Consisten en dos alambres verticales paralelos alimentados con corriente continua. La resistencia del sensor, y por tanto la tensión de salida, es proporcional a la longitud seca de los alambres, cortocircuitados a la altura de la superficie del agua. La variación del nivel de agua provoca el cambio correspondiente de la longitud seca, que se traduce en variación de resistencia y por consiguiente de tensión. Así pues, la medida de la tensión permite conocer, a través de un factor de calibración, el nivel instantáneo del agua.
- **Sondas de capacidad** : El sensor tiene un solo alambre, que se alimenta en este caso con corriente alterna. La capacidad del sensor es en este caso proporcional a la longitud seca del alambre, así como la tensión de salida.

La señal recogida por cualquiera de estos métodos es acondicionada y amplificada para su transmisión a través de la red de medida. El paso a través de un conversor analógico-digital transforma las señales eléctricas en información digitalizada tratable con medios informáticos. De esta forma, se permite el almacenamiento de series de valores en el disco de un ordenador para su análisis posterior.

Desarrollo de los ensayos

Para el análisis exhaustivo de los fenómenos del oleaje en las diferentes zonas del modelo se fijan una serie de puntos de medida de la altura de ola. Estos se suelen distribuir de modo uniforme en las áreas objeto de estudio, con distancias entre 1 y 3 m. En zonas de especial interés, se suelen acumular puntos a fin de obtener mayor detalle en la información. Dependiendo de la extensión del modelo y de los fenómenos a estudiar, se suelen disponer de 10 a 200 puntos de medida.

Los tiempos de medida han de ser tales que se recoja un número de olas suficiente para realizar un análisis

estadístico fiable (200-300 olas). Habitualmente, en las escalas normales, los tiempos de medida van de 3 a 15 minutos. Por otra parte, la frecuencia de muestreo vendrá fijada por condicionamientos espectrales y limitada por la capacidad de los equipos de medida. En este sentido, el margen más frecuente es 10-50 puntos/segundo.

Sobre los datos tomados en cada ensayo se realiza un análisis estadístico para cada punto, con el fin de

N	=	Número de olas registrado
Hs	=	Altura significativa Ts = Período significativo
Hmed	=	Altura media Tmed = Período medio
Hmáx	=	Altura máxima Tmáx = Período máximo
Hmín	=	Altura mínima Tmín = Período mínimo
Distribución conjunta alturas-períodos		
Espectro local		

alimentación.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la interpretación de los resultados obtenidos se analizan fundamentalmente los valores de los coeficientes de agitación locales k_i , definidos como la relación entre la altura de ola significativa en el punto considerado (Hs_i) y la altura significativa de referencia (Hs_0), medida en un punto situado en el exterior del puerto, en áreas no afectadas por éste:

$$k_i = Hs_i / Hs_0$$

Los coeficientes de agitación se pueden interpretar de una forma sintética definiendo unas zonas de cálculo significativas en cuanto al comportamiento hidrodinámico del puerto o sus condiciones de explotación, a fin de obtener criterios de comparación



Figura 6. Ensayos de agitación. Puerto de Cádiz (escala 1:125)

determinar los siguientes parámetros :

El proceso de medida se repite para las distintas configuraciones

(soluciones alternativas de construcción o fases de avance de la obra), niveles de marea y condiciones de oleaje (distintas direcciones, espectros o incluso alturas).

La altura de ola a utilizar se elige en general de forma que sea suficientemente representativa desde el punto de vista de las condiciones locales y compatible con una adecuada generación del oleaje, evitándose en todo momento el descrestamiento de las olas que pudiera

inducir pérdidas por rotura en la zona de entre unas y otras soluciones. En cada una de estas zonas, para cada solución y oleaje ensayados, se determinan el coeficiente de agitación medio (K_{med}) y máximo ($K_{máx}$) en la zona, junto con la desviación estándar del coeficiente.

La figura adjunta muestra un ejemplo de resultados de los ensayos realizados para la ampliación del Puerto de Las Palmas, con la agitación media en el Muelle Adosado al Dique Reina Sofía para varias soluciones y direcciones de oleaje.

Otro sistema de interpretar los resultados consiste en dibujar las curvas de isoagitación para cada situación (dirección y período de oleaje con una solución

AGITACION MEDIA EN EL MUELLE

ADOSADO AL DIQUE REINA SOFIA

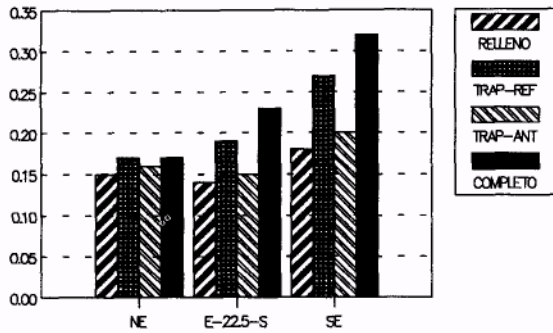


Figura 7. Coeficientes medios de agitación en el Muelle Adosado al Dique Reina Sofía (Las Palmas)

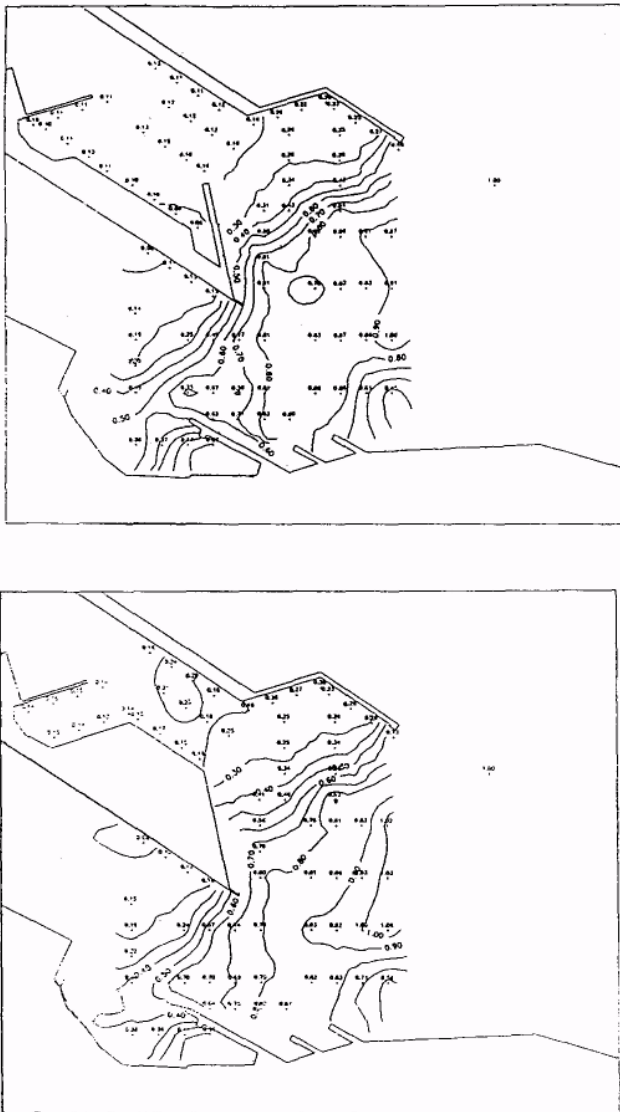


Figura 8. Agitación en la Ampliación de Las Palmas. Fases 1 y 2. Oleaje del Este $T_p=12$ s.

constructiva determinada). Estas curvas, como es sabido, determinan las zonas en que la agitación está comprendida entre determinados intervalos, lo que facilita la comparación de las diversas soluciones.

Las figuras siguientes muestran los resultados de los ensayos de agitación para la Ampliación del Puerto de Las Palmas materializados en los planos de isoagitación. De una forma sencilla, puede compararse la bondad de cada solución, detectando las zonas que aumentan su resguardo, así como aquéllas que ven incrementada su agitación.

ENSAYOS DE ESTABILIDAD Y ESFUERZOS EN OBRAS MARÍTIMAS

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. Esta optimización es necesaria dado el elevado coste de este tipo de elementos de defensa, pero resulta difícil de realizar mediante formulaciones matemáticas por la complejidad de las acciones del oleaje.

La magnitud y distribución de las presiones debidas al impacto del oleaje sobre una estructura marítima depende de gran número de factores, entre los que destacan:

- Profundidad
- Configuración del fondo
- Geometría de la estructura
- Nivel de marea
- Duración del temporal
- Altura de ola

Las formulaciones de diseño existentes permiten elaborar prediseños acertados, pero nunca tienen en cuenta la totalidad de los factores presentes. 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 solicitaciones 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 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 mantenimiento, si está infradimensionada.

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

■ Estructuras en talud:

Selección de secciones tipo y elementos resistentes.
Características resistentes de la estructura.
Evolución temporal de averías.
Coeficientes de reflexión del oleaje.
Transmisión del oleaje sobre estructuras rebasables.
Rebase del oleaje sobre estructuras y diseño de espaldones.

■ Estructuras verticales:

Selección de secciones tipo.
Fuerzas horizontal y vertical y momento de vuelco.
Resistencia al deslizamiento y vuelco.
Selección de estructuras de apoyo.
Coeficientes de reflexión del oleaje.
Rebase del oleaje sobre el dique.
Diseño de espaldones para minimizar rebases y esfuerzos.

Instrumentación

La instrumentación utilizada en este tipo de ensayos comienza por las **sondas de medida de oleaje**, que sirven para controlar la altura de ola que se aplica como acción exterior. Como mínimo se emplea una sonda en cada ensayo, pero es habitual colocar varios de estos sensores, a fin de obtener información sobre las alturas de ola incidente lejana, incidente próxima a la obra, reflejada y, en su caso, transmitida.

En los ensayos de diques en talud se emplean **cámaras de fotografía y video** para guardar registros visuales de la evolución de la sección, con lo que se pueden comparar las posiciones sucesivas de la escollera o los bloques artificiales. Igualmente, permiten analizar la forma de rotura del oleaje sobre la estructura.

También se emplean **medidores de perfil**, con el fin de detectar la evolución de la sección de la estructura, y especialmente de la envolvente del manto. Estos

medidores pueden ser manuales, o utilizar técnicas de ultrasonidos, infrarrojos o láser.

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.

El sistema de medida y registro de datos por medios informáticos, cuando es posible, es semejante al explicado en los ensayos anteriores, utilizando conversores *ADIDA* para el almacenamiento de datos en ordenador.

Análisis de escalas

En los modelos hidráulicos en los que se estudia la estabilidad de diques verticales o en talud, las fuerzas que intervienen en el sistema oleaje-estructura son las de inercia (F_i), gravedad (F_g), viscosidad (F_v), tensión superficial (F_σ) y elasticidad (F_e).

De entre estas fuerzas, unas presentan una acción predominante sobre otras cuyo efecto sobre los resultados puede considerarse despreciable. Por el carácter prácticamente incompresible del agua, puede despreciarse en principio el efecto de las fuerzas de elasticidad. Las tuerzas de tensión superficial pueden considerarse también despreciables dentro del rango de las dimensiones de los parámetros característicos del oleaje en el modelo en este tipo de ensayos. Estas fuerzas son muy poco significativas cuando la longitud de onda es superior a 30 cm y los períodos están por encima de 2.0-2.5 s.

Quedan por tanto, como más importantes, las fuerzas gravitatorias y de viscosidad.

Por tanto, la semejanza dinámica completa requeriría la igualdad de los números de Fraude y Reynolds en modelo y prototipo. Como se explicó anteriormente, es imposible manejar un fluido que cumpla esta premisa, salvo a escalas muy próximas a la unidad. Por consiguiente, al seleccionar la Ley de Semejanza de Fraude se producirán ciertos efectos de escala por la acción de la viscosidad.

El régimen de flujo de agua a través de los huecos de la estructura en prototipo es de carácter turbulento. En el modelo, si los huecos existentes entre los elementos que componen las diferentes capas del dique fueran excesivamente pequeños, el régimen de flujo podría no ser suficientemente turbulento, por lo que la energía perdida por fricción y la energía reflejada serían mayores con respecto al prototipo. Ello se traduciría en una mayor tendencia a la aparición de averías, y por tanto no se obtendría un comportamiento perfectamente semejante al del prototipo en cuanto a la estabilidad de los elementos del manto principal.

Según diversos investigadores (Dai y Kamel, Hudson, Davison), podrán considerarse despreciables los efectos de escala debidos a la viscosidad para valores del número de Reynolds en modelo

$$Re_m > 3 \cdot 10^4$$

Para dichos valores las condiciones del flujo de agua a través de los huecos de la estructura en el modelo se aproximarán a las condiciones del flujo en prototipo.

El número de Reynolds se define como:

$$Re = vL/\eta$$

con L = longitud característica
V = velocidad característica
 η = viscosidad cinemática del agua $\mu/\rho \approx 10^{-6}$

Para el caso de un ensayo de estabilidad de dique en talud se toma como longitud característica la correspondiente al lado del cubo equivalente de los elementos que componen el manto exterior (le). Como velocidad característica puede adoptarse la correspondiente a la masa de agua que incide sobre el talud debido a la acción de la ola:

$$V = \sqrt{gH}$$

Siendo g = aceleración de la gravedad

H = altura de ola significativa de iniciación de averías.

Por tanto, el número de Reynolds puede determinarse según la expresión:

$$Re = \sqrt{gH} \cdot le / \eta$$

La escala de este tipo de modelos se elige, una vez más, teniendo en cuenta el tamaño del canal en que se realizan los ensayos y la capacidad de la paleta generadora de oleaje para reproducir las alturas de ola previstas en el

programa de ensayos según los espectros de oleaje considerados y la profundidad de agua en el canal. Lo mismo cabe decir de la capacidad de los equipos de medida (sondas, dinamómetros, sensores de presión) Además, interesa elegir escalas para las que se disponga de elementos para la construcción del modelo (escolleras y bloques).

Las escalas utilizadas habitualmente van de 1:20 a 1:60, según la disponibilidad de equipos y canales, dependiendo también de las dimensiones del dique a estudiar. Existen, sin embargo, tanques de grandes dimensiones (Delta Flume, en Holanda), que permiten realizar ensayos a escalas mucho mayores.

Para la reproducción del peso de los elementos en el modelo, conviene tener en cuenta la diferencia existente entre el peso específico del agua dulce, utilizada en los ensayos, y el del agua del mar, con lo que la escala de densidades sería

$$(\rho)^p / (\rho)_m = 1.025/1.000$$

Los bloques y escollera pertenecientes al modelo deberían estar por tanto en esta relación. De esta forma la escala de pesos vendría dada por la siguiente expresión:

$$P_p/P_m = \rho_p L_p^3 / \rho_m L_m^3 = (L_p/L_m)^3 \cdot 1.025$$

siendo ρ el peso específico de los elementos.

Sin embargo, teniendo en cuenta que debe conservarse el número de estabilidad de Hudson en modelo y prototipo, es necesario tener en cuenta las diferencias de densidades de materiales y líquido entre modelo y prototipo, por lo que debe considerarse la expresión:

$$P_m = P_p \cdot (1/\lambda)^3 \cdot \rho_m / \rho_p \cdot ((S-1)_p / (S-1)_m)^3$$

donde S es la relación entre el peso específico del elemento en cuestión y el peso específico del líquido en el que se encuentra inmerso.

Construcción del modelo

Los ensayos se llevan a cabo habitualmente en canales o tanques. Las longitudes de éstos van de 10 a 100 metros, mientras las anchuras están normalmente entre 1 y 8 metros. Las profundidades varían entre 30 cm y 3 m en los mayores tanques.

En uno de los extremos del canal, con la máxima profundidad, se encuentra situada la paleta generadora de oleaje. En el extremo opuesto se construye una rampa amortiguadora de oleaje con objeto de evitar las reflexiones hacia la paleta durante la fase de calibración del espectro de oleaje. En la zona central se construye una rampa que conduzca desde la zona de generación de oleaje hasta la posición de la sección (profundidad de diseño).

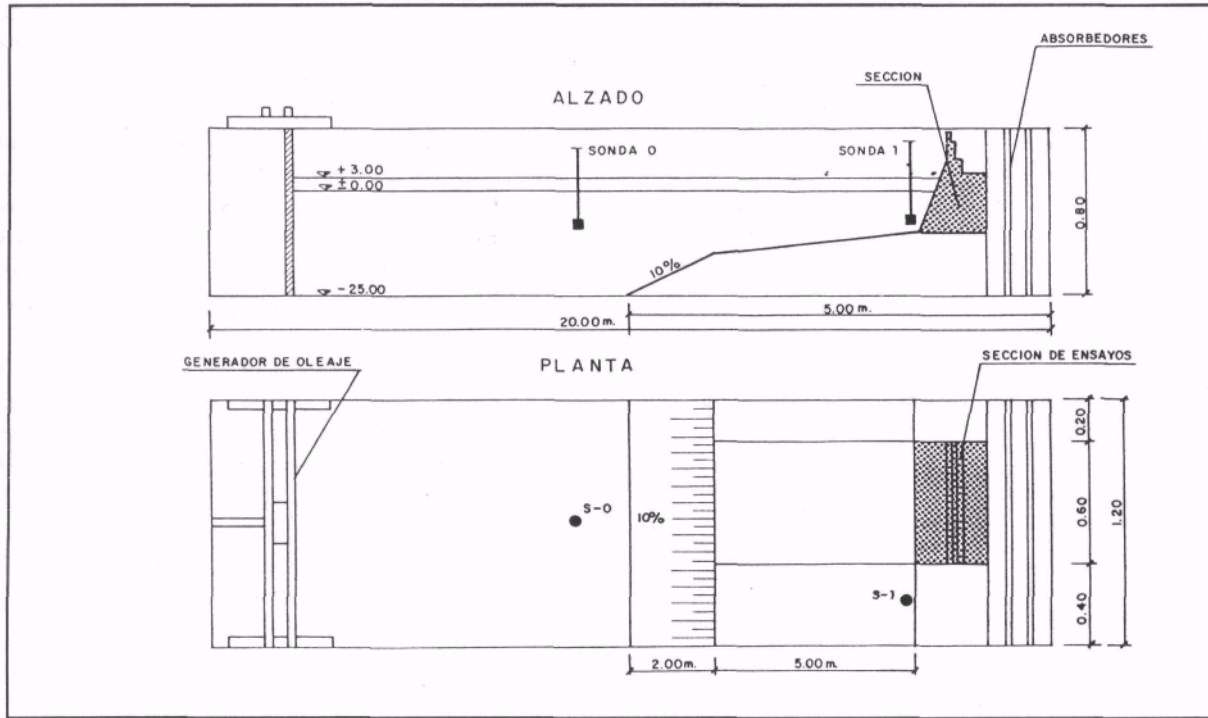


Figura 9. Disposición general de un tanque de ensayos

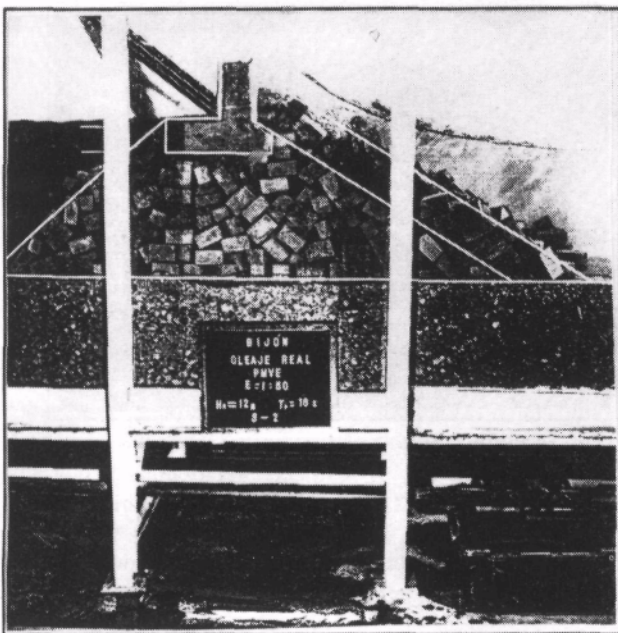
Los ensayos más habituales son tridimensionales, y en ellos se construye una sección del dique objeto de estudio. Para estos ensayos, pueden utilizarse canales relativamente estrechos. En ocasiones, interesa analizar el comportamiento de zonas singulares (morros, enlaces entre distintos tramos, quiebras, etc.), por lo que se realizan ensayos tridimensionales en tanques de mayor anchura, a fin de disminuir las reflexiones indeseadas y reducir los efectos de borde.

Figura 10. Sección del Dique Exterior del Puerto de Gijón (Escala 1:50)

La sección se reproduce con la mayor exactitud, disponiendo elementos de los pesos adecuados en cada zona (núcleo, mantos intermedios, manto principal, banquetas, etc.) y respetando la geometría de la sección de proyecto (taludes, bermas, forma de espaldones, etc.). El material utilizado es el mismo que en el dique real, es decir, mortero de cemento o piedra de diferentes clases, a fin de respetar las densidades originales. En ocasiones, para algunos elementos específicos cuya densidad no afecta al desarrollo del ensayo (espaldones, cajones, etc.) se utilizan módulos prefabricados de madera o plástico, lastrados convenientemente.

Los bloques o escollera de los diques en talud se colocan aleatoriamente o siguiendo un esquema prefijado, según los casos. Durante la colocación se cuenta el número de elementos presentes en el modelo, a fin de evaluar correctamente las averías. Es frecuente aplicar pintura de colores diferentes a las distintas zonas del dique (zona sumergida, zona activa, zona emergida, etc.), a fin de identificar lo mejor posible los desplazamientos de los bloques o piedras.

En los diques verticales se reproduce un tramo del dique, y se construye una rebanada central que se aísla de los laterales. Sobre ella se medirán las fuerzas ejercidas por el oleaje, eliminando la influencia de las secciones adyacentes.



Desarrollo de los ensayos

Los oleajes a ensayar se seleccionan, lógicamente, mediante un estudio de régimen extremal, seleccionando un período de retomo apropiado en función del tipo de dique. El ensayo se realiza, en el caso de diques en talud, reproduciendo un temporal de altura de ola significativa creciente en diferentes etapas. Las primeras alturas sirven para compactar la sección tras la construcción del modelo. Es habitual aplicar escalones de 1 hora de duración con alturas creciendo en intervalos de 0.5 m o 1.0 m, según los casos. Si se dispone de esa información, puede reproducirse la evolución de temporales reales en

la zona.

Para los diques verticales, se aplican las alturas máximas, con el fin de evaluar los coeficientes de seguridad mínimos de la estructura. En el caso de medir rebases, se aplican también alturas intermedias, con el fin de analizar su incremento con la altura de ola.

En los **ensayos de diques en talud**, para reproducir las condiciones reales, no se reparan los daños en el modelo, de manera que el estado final de una sección al término de cada etapa de ensayo corresponde al estado inicial al comienzo de la siguiente altura de ola significativa.

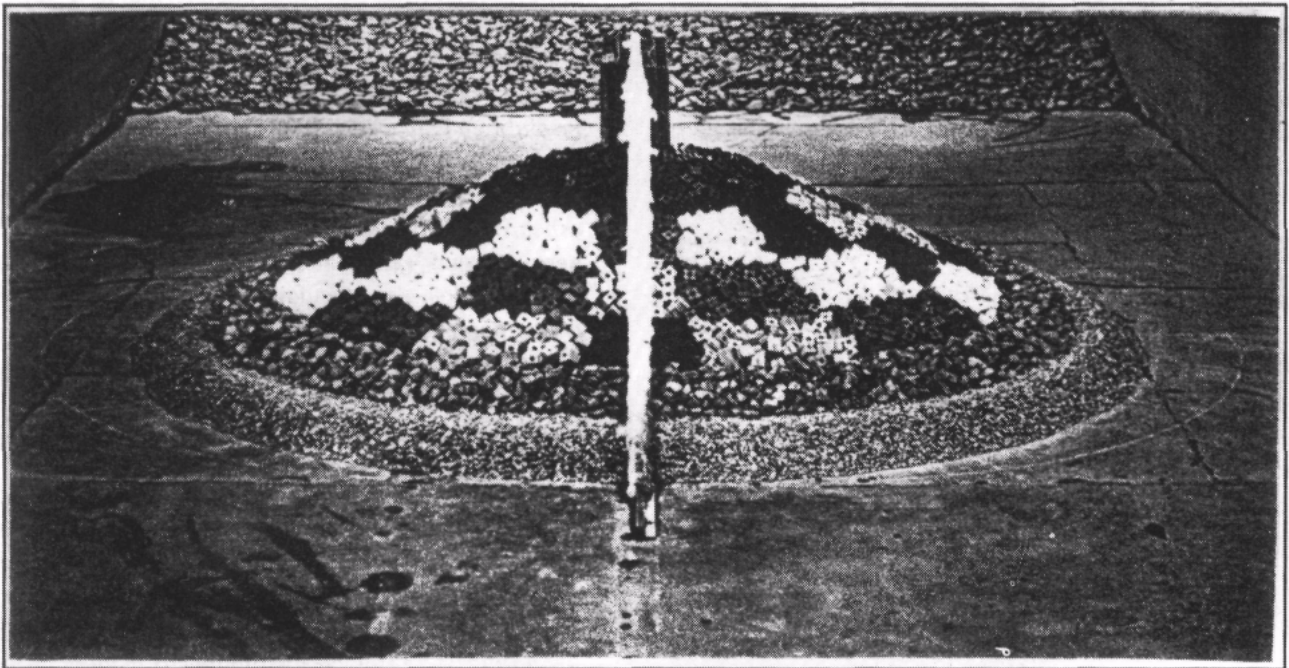


Figura 11. Ensayo de estabilidad

Las averías en el manto principal se analizan contabilizando el número de elementos desplazados de su posición inicial una distancia igual o superior al lado equivalente. El seguimiento de los daños producidos se lleva a cabo de forma parcial para cada una de las zonas de diferente color en que se divide el manto principal, y de una forma global considerando todo el manto sin distinción de zonas.

Para un seguimiento a posteriori del comportamiento de las secciones frente al oleaje de ensayo, se toman fotografías de las mismas antes del ensayo y después de cada altura de ola significativa de ensayo. Igualmente, si se elige esta forma de análisis, se mide el perfil del manto exterior en cada etapa del temporal.

El desarrollo de los **ensayos de medida de esfuerzos** consiste en someter a la sección a la acción del oleaje

para diversas alturas de ola significativa y medir con el dinamómetro el valor de los esfuerzos y momentos correspondientes a cada una de las olas del registro. La duración del registro de oleaje, como en casos anteriores, debe comprender al menos unas 300 olas, cada una de las cuales produce un impacto de mayor o menor intensidad sobre la sección ensayada. Al mismo tiempo, se toman datos de oleaje mediante una sonda colocada en la zona de desarrollo del oleaje. Mediante un análisis estadístico, pueden obtenerse la altura de ola significativa incidente H_i , la altura de ola máxima $H_{m\acute{a}x}$, y los períodos significativo $T_{1/3}$ y medio T_{medj} del oleaje.

Una vez finalizada la toma de datos se analizan los esfuerzos horizontal F_x , vertical F_y y momento de vuelco M en cada impacto, seleccionándose los de mayor intensidad y asociándose éstos a la altura de ola significativa medida.

Para el estudio del comportamiento de las secciones frente al rebase, se analizan dos aspectos: Por un lado, se contabilizan los rebases producidos para cada altura de ola significativa durante un tiempo determinado. Conocido el número total de olas que inciden sobre la sección, el resultado se expresa como porcentaje de las olas que rebasan el espaldón respecto al número total de olas que alcanzan el dique:

$$\% \text{ REBASE} = N^{\circ} \text{ de rebases} / N^{\circ} \text{ de olas} * 100$$

Por otro lado, puede llevarse a cabo un estudio sobre el volumen de agua que rebasa el dique por unidad de tiempo y longitud en un temporal determinado, mediante el uso de un recipiente que recoge el agua que rebasa la estructura.

La tasa o caudal de rebase por metro lineal de dique, puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$Q = (V * 10^{-3}) / (t * I)$$

donde Q = tasa de rebase

V=volumen de agua recogido en el modelo en litros

t = tiempo de recogida

I = longitud de dique en el modelo

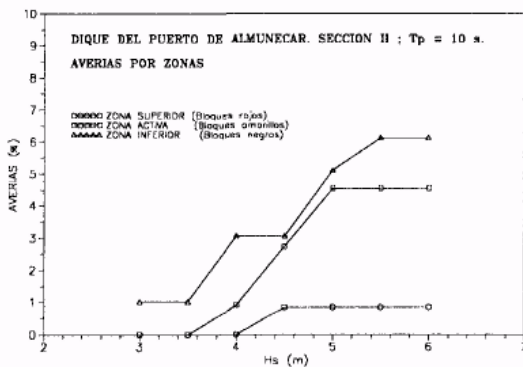


Figura 12. Gráfico de estabilidad zonal del Dique de Almuñecar

Análisis de resultados

En los ensayos de diques en talud, el análisis de resultados más habitual consiste en elaborar tablas que recogen los daños producidos por el temporal de ensayo en cada una de las zonas (bloques de diferente color) y en la totalidad del manto. Los valores típicos utilizados son los siguientes:

- Número de elementos desplazados o caídos en cada etapa.
- Número de elementos desplazados o caídos acumulados desde el inicio del ensayo.

- Porcentaje de averías, expresado como relación entre el número de elementos acumulados y el total.

Se elaboran también gráficos que presenten la evolución de los daños en cada una de las zonas en que se dividió el manto principal y de las averías globales, en función de la altura de ola o el parámetro de estabilidad de Hudson (N_s). De ellos se puede deducir fácilmente qué solución de entre las alternativas propuestas resulta más favorable, o también detectar las zonas más débiles de la estructura diseñada, facilitando la labor de corrección y optimización.

El análisis de esta información permitirá tomar decisiones acerca del diseño de la sección, que conduzcan a:

- Modificar la geometría de la sección (pendientes, número de capas, bermas, cotas de coronación, etc.).
- Seleccionar elementos resistentes (escollera, bloques cúbicos, bloques esbeltos, etc.).
- Modificar pesos iniciales de los elementos.
- Modificar características del espaldón (cota, posición, etc.).

En los ensayos de diques verticales, un programa de ordenador convierte las señales analógicas del dinamómetro en unidades de modelo, y mediante un sencillo cálculo determina el momento de vuelco sobre la arista dorsal del cajón, a partir de los esfuerzos referidos al centro del dinamómetro. De manera análoga, se integran las curvas de presiones. Para cada ola, se listan los valores máximos de los tres esfuerzos (F_x , F_y , M) en dicha ola, ya en unidades de prototipo (F_x y F_y en t/m y M en t*m/m). Asimismo, se obtiene el tiempo en que se produce cada uno de dichos tres esfuerzos máximos.

Una vez obtenido el registro de fuerzas y momentos se selecciona el impacto más desfavorable, correspondiendo generalmente a aquél en el que se produce el máximo valor de la fuerza horizontal de todo el registro. En la mayoría de los casos, en este impacto se produce también el máximo valor para el momento de vuelco, coincidiendo además en muchos casos en el mismo instante que la fuerza horizontal máxima del registro.

Una vez obtenida la tripleta de valores en el impacto más desfavorable, se determinan los coeficientes de seguridad al vuelco y al deslizamiento a partir de las características resistentes del cajón, con objeto de disponer de un criterio de valoración para considerar admisible o no una determinada solución.

Pueden evaluarse entonces distintas soluciones, valorándose aspectos varios del diseño del dique:

FUERZA HORIZONTAL MÁXIMA SOBRE EL DIQUE
VERTICAL DEL PURETO OLIMPICO ($H_s = 7.5M$)

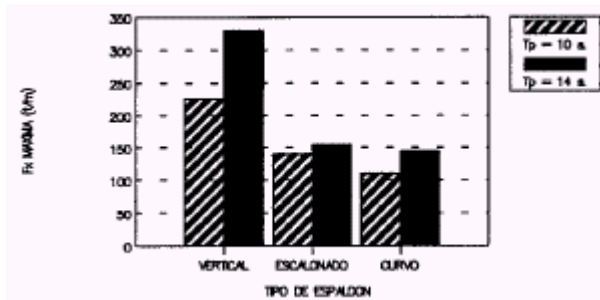


Figura 13. Fuerzas horizontales máximas sobre el dique del Puerto Olímpico para diversos espaldones y oleajes

- Selección de la anchura y peso del cajón
- Influencia de la cota de coronación del espaldón
- Influencia del retranqueo del espaldón
- Influencia de la geometría del cajón y el espaldón
- Modificaciones en la banqueta de apoyo

El análisis de rebases se realiza a partir de los resultados de número de rebases y caudal o tasa de rebase por metro lineal de dique. El porcentaje de rebases permite comparar unas soluciones constructivas con otras, a la vez que es un indicador de la bondad de la obra desde el punto de vista de explotación. Desde el punto de vista del caudal de rebase, pueden adoptarse dos criterios diferentes: El primero consiste en disponer una cota de espaldón suficiente de manera que no se produzcan rebases. Este criterio resulta en la mayoría de los casos económica y estéticamente poco recomendable. El segundo criterio es definir un "rebase máximo permisible" (Goda, 1970). El inconveniente es que este concepto resulta difuso y difícil de cuantificar, dependiendo del tipo de instalaciones y utilización de la zona protegida por el dique. Las alternativas de diseño que mantengan el caudal de rebase por debajo de dicho límite para las alturas de ola de cálculo, serán por tanto admisibles. Fijar un límite de estas características es complicado ya que existen pocos datos publicados del fenómeno.

La más completa investigación que se ha realizado hasta la fecha es la llevada a cabo por Fukuda, Uno e Irie (1974), y presenta una evaluación del efecto de diferentes intensidades de rebase a partir de observaciones y medidas realizadas en campo.

No obstante, hay que recordar que existen factores tales como la intensidad del viento y el tamaño de las gotas de agua en el modelo que no permiten tomar como válidos desde el punto de vista cuantitativo los resultados del caudal de rebase en modelo, aunque sí es posible determinar qué solución es la que presenta el comportamiento más satisfactorio.

ENSAYOS SEDIMENTOLÓGICOS

Objetivos

La posibilidad de modelizar con precisión los procesos hidrodinámicos y sedimentarios de la zona "nearshore" es esencial para una amplia gama de problemas de Ingeniería de Costas. Aparte de la contribución al entendimiento de complejos procesos, esta posibilidad ayudaría sustancialmente a la hora del diseño de actuaciones concretas.

A pesar de que la modelización numérica ha avanzado sustancialmente en la pasada década, los mecanismos en ella representados todavía se basan en cuantificaciones realizadas a través de estudios de campo y de modelo físico. Más aún, la complejidad de la geometría de algunos casos, unido a la ventaja de la visualización y al hecho de tratar con una versión a escala del sistema de interés, hace que la modelización física sea, todavía, la opción más adecuada para numerosos casos. Por tanto, parece que al menos durante algunas décadas los modelos físicos de los procesos costeros.

Para una modelización correcta de los procesos sedimentarios han de tenerse en cuenta dos requisitos:

- (1) el conocimiento de las fuerzas dominantes
- (2) el entendimiento de los mecanismos de respuesta del sedimento

En este capítulo se analizan los modelos a escala para el estudio de la erosión costera. En los modelos de este tipo aparecen involucrados el transporte longitudinal de sedimentos, el transporte transversal, y frecuentemente también la erosión al pie de las estructuras. Un modelo reducido de fondo móvil puede ser aplicable para los siguientes casos:

- investigación del efecto de las estructuras costeras sobre la costa
- estabilidad de modificaciones efectuadas en la misma (tales como playas artificiales, de bolsillo, colgadas, etc.)
- diseño de estructuras para prevenir o mitigar la erosión.

Los estudios sobre la erosión costera por medio de un modelo físico de fondo móvil, desde el punto de vista cuantitativo, suelen no ser prácticos con el actual estado del arte de la técnica. Sin embargo, para diversos tipos de problemas de erosión costera, los estudios en modelos de este tipo son factibles, y pueden ser desarrollados de tal manera que se pueda extraer de ellos información útil y suficientemente detallada a efectos de diseño. Si se

dispone de datos adecuados en prototipo, y el proceso de verificación del modelo resulta con éxito, el investigador puede tener confianza en los resultados proporcionados por el mismo.

La investigación por medio de modelos físicos de fondo móvil es, quizá, uno de los tipos de estudio en modelo más difícil de realizar de manera satisfactoria. Hay un cambio de régimen de flujo al comparar el movimiento del sedimento fuera de la zona de surf y dentro de ella, por lo que no es posible la similitud completa y simultánea de los procesos físicos dominantes en ambos regímenes (utilizando el mismo fluido y las mismas leyes de escala para reproducir el oleaje, las corrientes, y el material del fondo para ambos casos). Otros efectos, tales como las ondas de orilla, corrientes de retorno, espectro direccional, ondas largas, y distribución granulométrica del sedimento en prototipo deben ser considerados aunque sólo sea para comprobar que no son importantes en la ubicación del estudio.

Una alternativa a los modelos de fondo móvil son los llamados de "fondo semi-móvil", que usan un fondo fijo y una pequeña cantidad de material trazador para indicar cualitativamente las pautas del transporte de sedimentos. Estos estudio son más baratos de ejecutar y, dependiendo del caso en cuestión, pueden ser solo ligeramente menos útiles que los de fondo móvil. Este tipo de estudios de trazadores pueden ser realizados sobre modelos existentes, probablemente utilizados para otros fines, sobre los que se desee obtener información acerca del movimiento del material.

En el estado actual de la técnica, la modelización física del transporte de sedimentos debe ser considerada como un arte más que como una ciencia. A pesar de que el desarrollo de este arte es difícil, puede ser útil cuando es entendido completamente. En cuanto a las relaciones de semejanza de los modelos físicos de fondo móvil, varias expresiones han sido desarrolladas a lo largo del tiempo, contando cada una con sus particulares restricciones e hipótesis. El origen de estas expresiones varía desde las puramente empíricas hasta las completamente teóricas. Así las cosas, el investigador se encuentra en la encrucijada de elegir entre muchas alternativas, y probablemente más de una será satisfactoria.

Análisis de escalas

Las relaciones de semejanza a aplicar en los modelos físicos de fondo móvil aparecen descritas en multitud de referencias en la literatura. En este apartado se presentan los puntos principales de dichas relaciones de semejanza más que la discusión completa sobre este tema. La discusión de las escalas del modelo se describen según diversos autores en orden cronológico:

Noda (1972), Kamphuis (1975, 1982), Dean (1985) y Sayao (1988).

Criterios de escalasa de Noda

Noda (1972) llevó a cabo un estudio en el que comparó datos de prototipo y de laboratorio con objeto de determinar las relaciones de semejanza para la zona de surf. En total utilizó 130 perfiles con 14 materiales diferentes (incluso arena y materiales sintéticos) y 22 tamaños de grano.

Los perfiles "prototipo" eran, en realidad, perfiles obtenidos en ensayos en tanque de oleaje efectuados por Watts (1954), con tamaños de material de 0.22 mm, 0.46 mm, 1.20 mm, y 3.46 mm.

Los cuatro parámetros considerados fueron:

Relación de escala vertical: L_{vr}

Relación de escala horizontal: L_{Hr}

Relación de diámetro de sedimento: D_r

Peso sumergido relativo: γ'_{sr}

Siendo $\gamma'_{sr} = \frac{\gamma_s - \gamma_f}{\gamma_f}$

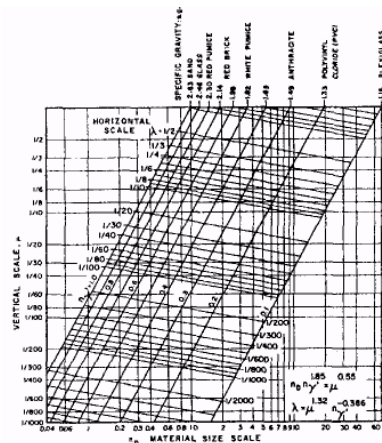


Figura 14. Representación gráfica de las leyes de semejanza propuestas por Noda (1972).

En principio, Noda intentó desarrollar las leyes de modelización usando el mismo material (arena del mismo tamaño y peso específico) en modelo y prototipo. Sin embargo no fue posible conseguir perfiles a escala. Se halló que, para un modelo con arena de $D = 0.565$ mm y prototipo con arena de $D = 1.2$ mm, había acuerdo entre los perfiles de modelo y prototipo siempre que las escalas horizontal y vertical verificaran las condiciones siguientes:

$$D_r = (L_{vr})^{0.55} \tag{5}$$

$$L_{Hr} = (L_{vr})^{1.32} \tag{6}$$

Estas condiciones fueron extendidas de arena a materiales ligeros. Las ecuaciones siguientes representan las recomendaciones finales:

$$D_r (\gamma'_{sr})^{1.85} = (L_{vr})^{0.55} \quad (8)$$

$$L_{Hr} = (L_{vr})^{1.32} (\gamma'_{sr})^{-0.386} \quad (9)$$

que se corresponden con las ecuaciones (5) y (6) en el caso en que $\gamma_{sr} = 1$. Estas recomendaciones se muestran de manera gráfica en la Figura 12.

Según Noda, el experimentador es libre para escoger sólo dos de los cuatro siguientes parámetros de la modelización: D_r , γ_{sr} , L_{Hr} , L_{vr} , y los otros dos quedan relacionados por las expresiones (8) y (9).

Criterios de escala de Kamphuis

Kamphuis (1975, 1982) empleó el análisis dimensional para identificar los siguientes cuatro parámetros adimensionales que es necesario conservaren prototipo y modelo, con objeto de lograr una similitud dinámica:

Número de Reynolds del grano:

$$\frac{U_* D}{\nu}$$

Tensión cortante adimensional:

$$\frac{\rho U_*^2}{(\rho_s - \rho)g D}$$

Densidad adimensional:

$$\frac{\rho_s}{\rho}$$

Similitud geométrica de la partícula:

$$\frac{\lambda}{D}$$

siendo

- U_* = velocidad de corte
- D = diámetro de la partícula
- ρ_s = densidad del sedimento
- ρ = densidad del agua
- g = aceleración de la gravedad
- ν = viscosidad cinemática del fluido
- λ = longitud típica

Utilizando agua como líquido en el modelo, Kamphuis deduce que es imposible satisfacer las cuatro condiciones anteriores excepto a escala real. Se definen varias "clases" de modelos, según satisfagan algunas, pero no todas, las condiciones anteriores. Kamphuis identifica el "mejor"

modelo como aquél en que se satisfacen todas las condiciones excepto la del número de Reynolds. Esta simplificación sólo es válida si el sedimento del prototipo es lo suficientemente grueso como para que su correspondiente a escala no sea transportado de modo diferente.

Criterios de escala de Dean

Dean (1985) opina que el conocimiento de los procesos que intervienen en la zona costera mejoraría por medio de la evaluación de los errores que resultan de la aproximación más directa, que sería aquella que utilizaría un modelo sin distorsión de escala con las partículas del sedimento modelizadas según la semejanza de Froude.

El procedimiento recomendado por Dean es el siguiente:

- (1) El modelo será sin distorsión.
- (2) La hidrodinámica "nearshore" y los parámetros relevantes del sedimento serán modelizados según el criterio de Froude.
- (3) El proceso de rotura del oleaje será simulado adecuadamente; la escala del modelo será lo suficientemente grande como para desprejciar los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial.

En la modelización de Froude sin distorsión de escala, L_r , la escala de tiempos T_r , y la de velocidades V_r , resultan:

$$V_r = T_r = \sqrt{L_r}$$

La relación de escala para otros parámetros físicos de interés puede ser determinada directamente. Sin embargo, a la hora de llevar a escala las características del sedimento, es necesario considerar los aspectos dominantes de la interacción hidrodinámica-sedimento. Dentro de la zona de "surf", en general la región de más interés, se admite que los parámetros más importantes son la velocidad de caída del sedimento, w , y el ángulo de reposo, ϕ . La porosidad se considera que juega un papel menos importante.

El papel del ángulo de reposo en la estabilidad de una playa es obvio, especialmente en las proximidades del estrán, donde las pendientes son altas. La velocidad de caída es un parámetro cuya importancia puede ser explicada de diversas maneras, de forma intuitiva. La explicación más directa se refiere a la razón entre el tiempo de caída y el periodo del oleaje, especialmente en el caso de transporte por suspensión. Por ejemplo, consideremos una partícula suspendida a una cierta distancia del fondo en la posición de la cresta del oleaje. Si las partículas del modelo y del prototipo están suspendidas a unas distancias que guarden la relación de semejanza, entonces para que describan trayectorias similares, deben caer con una velocidad proporcional a la

de los periodos del modelo y prototipo. Esta velocidad de caída, w , debe seguir la ley de escala de Froude,

$$\omega_r = \sqrt{L_r} \quad (11)$$

En resumen, los requisitos propuestos por Dean para un modelo de fondo móvil son los siguientes:

- (1) Modelo sin distorsión, de acuerdo con la ley de semejanza de Froude.
- (2) Escala de velocidades de caída $\sqrt{L_r}$.
- (3) Cuando sea posible, ($D_m > 0.08$ mm), el material empleado debería ser arena. En caso contrario, material ligero con la velocidad de caída adecuada según la ley de escala de velocidades de caída.

Criterios de escala de Sayao

En 1988, Sayao propone una metodología de diseño de los modelos de fondo móvil. Propone el uso de modelos sin distorsión de escala, en los que el criterio de mantenimiento de la velocidad de caída sea satisfecho. En el caso de que por otras razones este parámetro no pueda ser conservado, recomienda que tanto el modelo como el prototipo tengan el valor del parámetro F_v , en la misma región, es decir, que tanto prototipo como modelo tengan F_0 simultáneamente bien por encima o bien por debajo del valor crítico $F_0 = 1$.

Por último, con respecto al tamaño del material, recomienda que el valor de H_b/D en el modelo supere el valor de 300 para asegurar que a la escala del modelo puede producirse transporte por suspensión.

En este modelo propuesto, las distorsiones debidas a la falta de semejanza pueden ser cuantificadas por medio de las siguientes escalas:

$$n_{t_s} = n / \sqrt{n_D}$$

$$n_{Q_s} = n^2 \sqrt{n_D}$$

DISEÑO DEL MODELO

Datos del prototipo

Un punto importante en la realización de un estudio por medio de un modelo de fondo móvil consiste en la obtención de los datos esenciales del prototipo, y en asegurarse que la calidad de los mismos es la adecuada para su empleo en la fase de verificación del modelo. Se considera esencial la recopilación de los siguientes datos:

- (a) Estudio detallado de la granulometría del sedimento en la totalidad de la zona de interés (tanto offshore, más allá de la zona de rotura de las olas más grandes consideradas importantes, como a lo largo de la costa).
- (b) Una estimación del transporte litoral neto anual y mensual. El empleo de varias formulaciones puede ser conveniente para garantizar que se escoge el valor más adecuado. Estos cálculos sirven para mostrar qué sector del clima marítimo es responsable de la mayor parte del transporte longitudinal (incluso si el cómputo total no es correcto, la contribución particular de cada componente será aproximadamente correcta); indican los meses durante los cuales es transportada la mayor parte del sedimento; proporcionan una indicación de la cantidad de material que puede ser transportado en cada sentido incluso cuando el transporte neto sea pequeño; indican la importancia relativa de los temporales.
- (c) Todas las batimetrías disponibles y fotos aéreas de la costa para ayudar a comprender los problemas existentes, o para anticipar problemas en el caso de la construcción de una estructura o la modificación de la topografía.
- (d) Medidas precisas simultáneas del oleaje y del transporte de sedimentos (tanto longitudinal como transversal). La extensión temporal de las mediciones debe extenderse a lo largo de un periodo de erosión y acreción y de un periodo de alta actividad de transporte y de baja actividad. Las medidas del oleaje deben ser precisas e incluir el espectro direccional del mismo. Estas medidas deberían efectuarse justo antes de la zona de rotura de las olas más altas esperadas. Además de los datos suministrados por los sensores, deberían tomarse fotografías con una periodicidad diaria, mostrando la oblicuidad de rotura del oleaje, y su posición. La medida de la marea es otro factor que no debe olvidarse.

La medida del transporte longitudinal y transversal de sedimentos es probablemente el problema más difícil en cuanto a la obtención de datos adecuados en prototipo para efectuar la verificación del modelo de fondo móvil.

Selección de las escalas y materiales del modelo

Tal como se mencionó anteriormente, no es viable la semejanza completa de todos los procesos dinámicos involucrados en el movimiento del sedimento. La semejanza de ciertos procesos dinámicos fijan la relación entre las dimensiones lineales en modelo y prototipo, las

características del material, y otros factores.

Al llegar a un determinado conjunto de leyes de escala a aplicar en un problema dado en una ubicación concreta, se deben analizar los siguientes aspectos:

- (a) Existencia de datos de oleaje en prototipo. Aquí se incluyen, entre otros, las estadísticas mensuales de oleaje y la incidencia de los temporales.
- (b) Cálculo del transporte longitudinal de sedimentos (a ser posible, utilizando diversas aproximaciones).
- (c) Tamaño del área de prototipo a modelizar.
- (d) Tipo y granulometría del material del fondo en prototipo.
- (e) Tamaño y posibilidades de la instalación de ensayos.
- (f) Materiales a utilizar en el modelo, bien disponibles o bien rápidamente adquiribles.
- (g) Precisión con la que se desean obtener los resultados del modelo.
- (h) Presupuesto disponible para la realización del ensayo.
- (i) Tiempo disponible para la realización del ensayo.
- (j) Personal cualificado disponible para la realización del ensayo.

Los aspectos arriba detallados pueden no ser compatibles en su totalidad, p. ej. el presupuesto o el tiempo disponible para la realización de un ensayo pueden no estar de acuerdo con la precisión con la que se desean obtener los resultados. Debe realizarse una planificación amplia y, lo que es más importante en este tipo de estudios, han de hacerse sin prisa y con una asignación de plazo, presupuesto, y medios humanos y materiales adecuados para asegurar la consecución de resultados útiles.

Sin embargo, después de la consideración conjunta de todos estos factores, sería deseable la realización de un conjunto de ensayos en canal antes de elegir las leyes de escala finales. Estos ensayos serían bidimensionales, del perfil de playa, en los que se intentaría reproducir las características dominantes de la playa, en cuanto al transporte transversal de sedimentos, utilizando diversas relaciones de escala y materiales. También servirían para analizar la repetibilidad de los resultados.

Otra comprobación deseable consistiría en utilizar un perfil medio del fondo para construir una sección de batimetría rectilínea y paralela. Sobre esta batimetría rectilínea y paralela se haría incidir un oleaje oblicuo, analizándose el transporte longitudinal y la evolución del fondo del modelo. Los resultados del modelo deberían ser comparados con los calculados o con los medidos durante la fase de adquisición de datos en prototipo.

Desarrollo de los ensayos

Calibración del modelo

El primer y más importante paso en la realización de un estudio cuantitativo de un problema de erosión costera o de transporte de sedimento por medio de un modelo de fondo móvil es la calibración del modelo. Para ello, se deben haber recopilado los datos suficientes durante la fase de adquisición de datos en prototipo para verificar que el modelo reproduce fielmente los aspectos de interés. Para ello, es importante que los datos correspondientes a la evolución del fondo en prototipo (erosión, acreción, y transporte de sedimentos) sean precisos, y que las condiciones correspondientes de oleaje incidente (altura, periodo, y dirección) sean conocidas.

La calibración inicial del modelo debe dirigirse hacia la reproducción de la erosión más severa a corto plazo, en el prototipo. Es de esperar que esto consista en un temporal de 1 o 2 días de duración, durante el que la dirección del oleaje haya permanecido relativamente constante, y sólo haya ocurrido una ligera variación de altura y periodo. Si se han obtenido los datos adecuados, a partir del prototipo, acerca de las tasas de erosión y de transporte longitudinal, entonces se puede intentar calibrar el comportamiento del modelo frente a la erosión a corto plazo. No obstante, surgirán numerosos problemas, y la sensibilidad de la respuesta erosiva del modelo debe ser correlacionada con cambios en las características del oleaje incidente (altura, dirección, y periodo). La respuesta del modelo no debe variar significativamente dentro de los márgenes de precisión de las medidas de altura del oleaje y de los cambios en la topografía del fondo en el prototipo. En caso de que se produzcan variaciones significativas fuera de este rango, entonces bien se debe mejorar la calidad de los datos obtenidos en prototipo, o bien el modelo es demasiado sensible y han de elegirse otras escalas y/o materiales.

Tras la verificación de las características erosivas a corto término, es necesario calibrar el comportamiento frente a condiciones de acreción de la línea de costa. Este proceso es frecuentemente a más largo plazo, y puede ser interrumpido para cambiar la dirección del oleaje y posiblemente también por pequeños o grandes temporales que provoquen una erosión adicional. Debe

hacerse un esfuerzo para reproducir fielmente las características de oleaje y marea correspondientes al prototipo durante este periodo. Si se consigue calibrar el modelo en cuanto a sus características de acreción, se ha dado un gran paso. El transporte longitudinal debe ser medido también y correlacionado con los datos de prototipo correspondientes a dicho periodo.

La fase siguiente en la calibración del modelo es la comprobación de que las tasas de transporte que se producen son las correctas. Habrá algunos periodos durante la fase de adquisición de datos en prototipo en las que el oleaje sea extremadamente oblicuo a la costa. Si el oleaje es de una altura significativa, producirá un transporte rápido del material.

Finalmente, se debería intentar la calibración del comportamiento de la playa para el periodo completo de medidas en prototipo. Si esto se consiguiera, el investigador podría tener confianza en los resultados del modelo.

Operación de los ensayos

Cualquier investigación en modelo reducido tiene sus limitaciones y problemas operativos. Sin embargo, un modelo reducido de fondo móvil plantea normalmente más problemas operativos que los demás. Algunas de estas limitaciones son:

- (a) **Contornos del modelo.** Cualquier modelo ha de tener unos contornos artificiales. Sin embargo, este hecho presenta diversos problemas en un modelo de fondo móvil. El sedimento ha de inyectarse a la tasa adecuada y en la ubicación adecuada (respecto a la línea de costa) a lo largo de un contorno lateral, y ha de ser retirado en el otro. La otra alternativa, a menudo poco práctica, consiste en modelizar un área suficientemente amplia como para que en la zona de interés no se produzca ningún efecto indeseable debido a la presencia de los contornos. Los contornos laterales del modelo son responsables de la creación de una circulación en aquél (debido a la interrupción de la corriente longitudinal y del transporte). Esta circulación puede ser compensada por medio de elementos absorbedores de energía en los contornos laterales del modelo, o por medio de un canal de retorno del agua desde un contorno lateral del modelo hasta el otro.

El contorno del lado mar del modelo puede introducir otra serie de efectos indeseables. Si el generador de oleaje produce una onda en la parte de atrás de él, esta energía ha de ser absorbida de manera efectiva. Si el coeficiente de reflexión de la playa del modelo y de la topografía del fondo no es despreciable, entonces debe

evitarse que esta energía sea reflejada por el generador de oleaje. En la mayor parte de los casos, este problema puede evitarse por medio de filtros de oleaje situados en el frente del generador.

Otro posible efecto debido a los contornos del modelo reside en la creación de ondas de orilla en el modelo debido a los contornos laterales. La presencia de estas ondas de orilla tienden a incrementar las corrientes de retorno del modelo.

- (b) **Características del generador de oleaje.** En la práctica, todos los generadores de oleaje tienen ciertas limitaciones intrínsecas. El oleaje que puede ser generado se encuentra limitado dentro de un cierto rango de periodos, y existe un límite máximo en el desplazamiento del generador que limita la altura de ola que puede generarse.
- (c) **Remodelado de la topografía del fondo.** Tras la finalización de un ensayo, una restricción operacional es la reconstrucción o remodelado de la topografía del fondo. Puesto que la topografía puede haber cambiado, ha de comprobarse y remodelarse el área completa del modelo. Durante los ensayos, a menudo se produce la clasificación del material por tamaños si es que el material de ensayo no es de granulometría uniforme, por lo que en este caso es necesario efectuar la mezcla del material antes de proceder a su remodelación.

Selección de las condiciones de ensayo

La selección de las condiciones de ensayo es un proceso relativamente sencillo. La primera tarea consiste en obtener datos de oleaje de "hindcast" para el área de interés. En segundo lugar, habría que calcular las tasas de transporte longitudinal de sedimentos para cada sector del oleaje.

Estos cálculos no es necesario que sean extremadamente precisos, pero deberían proporcionar una visión adecuada de la importancia relativa de cada sector de oleaje por lo que respecta al transporte de material. Estos datos, junto con los analizados durante la fase de adquisición de datos en prototipo, deberían ser adecuados para permitir una selección oportuna de las condiciones de ensayo. El clima de oleaje normal debería ser ensayado con particular énfasis en cada sector que produzca una contribución significativa a las tasas de transporte longitudinal anual.

En función de los datos adquiridos en prototipo, puede resultar necesario bien producir un oleaje espectral en el modelo, o bien generar oleaje monocromático de más de una dirección.

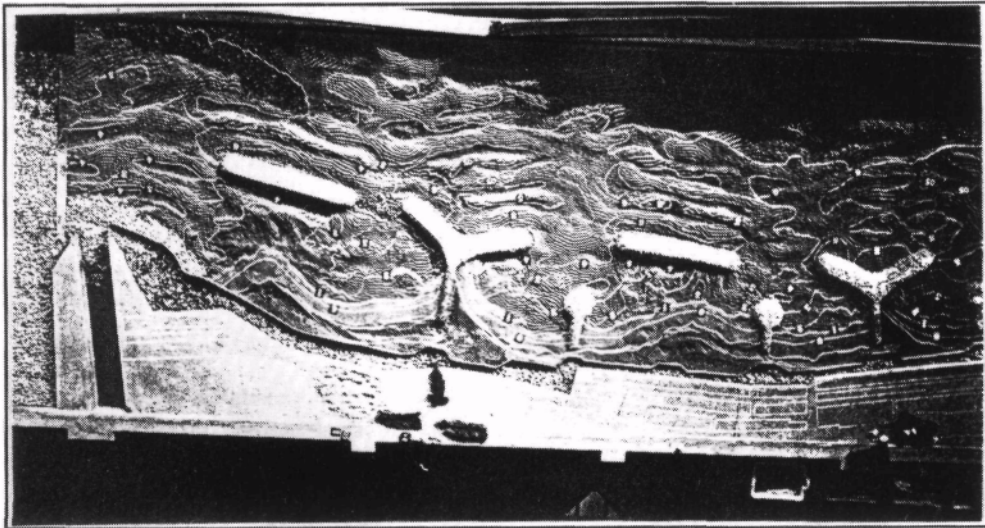


Figura 15. Modelo de la playa de Pedregalejo

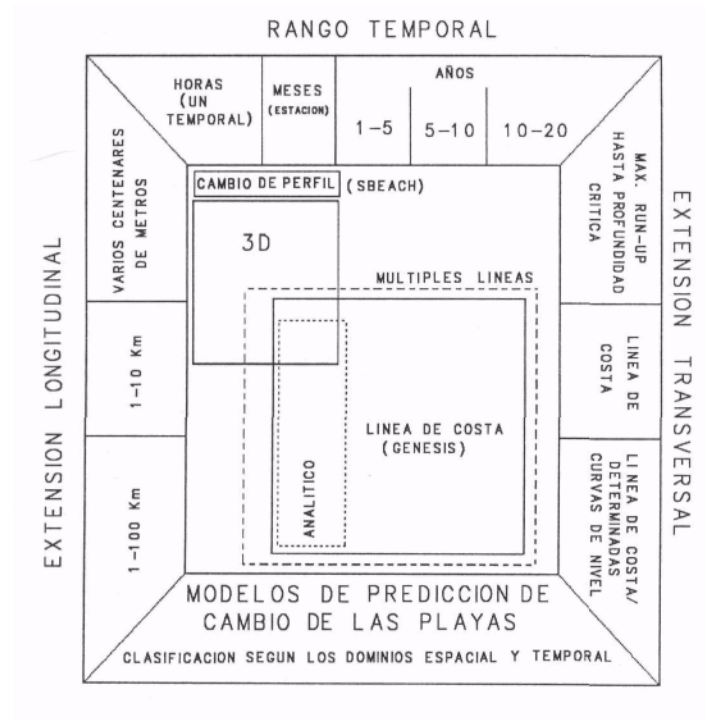


Figura 16. Clasificación según los dominios espacial y temporal

Medidas en modelo

El principal factor de interés en el modelo es la evolución de los fondos en función del oleaje incidente, del estado de marea, y de la duración del oleaje. Por lo tanto, es deseable efectuar medidas de las tasas de erosión y acreción, de perfiles del fondo, y de las tasas de transporte longitudinal. Son necesarias mediciones precisas de la altura del oleaje incidente y del estado de marea (especialmente durante la fase de verificación del modelo). También pueden ser necesarias medidas en modelo de altura de ola y de corrientes en aguas someras y en la zona de "surf".

La obtención de perfiles de la topografía del modelo es una tarea extremadamente importante y tediosa si no se realiza de manera automática. Existen diversos aparatos adecuados para este fin (acústicos, láser, ópticos). Los datos deberían recogerse en soporte magnético para su procesamiento posterior. Otras maneras más sencillas, tales como la colocación de hilos según las batimétricas y la realización de fotografías verticales que después se digitalizan y/o se procesan.

Las medidas en modelo de las tasas de transporte tanto transversal como longitudinal son ciertamente tan difíciles como lo son en prototipo.

Se pueden utilizar trazadores fluorescentes o radiactivos en conjunción con un sistema de conteo automático, constituyendo un sistema parecido al de obtención de los perfiles. Si un sistema de este estilo no resulta factible, entonces habrán de diseñarse trampas de sedimento.

Una estimación excelente de la tasa de transporte longitudinal puede obtenerse a partir de las cantidades de material inyectado en un contorno del modelo y retirado en el otro una vez que se haya alcanzado una situación de equilibrio.

La medición de los parámetros del oleaje se realiza con la instrumentación ya descrita en 4.4. Las corrientes en el modelo son medidas mediante correntímetros mono o bi-direccionales de tipo variado (electromagnéticos, laser-doppler, etc.)

Análisis e interpretación de resultados

A pesar de que muchas cuestiones referentes a la ejecución de modelos físicos de fondo móvil permanecen sin respuesta, este tipo de investigaciones se consideran factibles. El grado de confianza que se puede otorgar a estos estudios depende grandemente, para cada caso concreto, del éxito del programa de adquisición de datos en prototipo, de la selección de la escala y de los materiales, y de la fase de verificación del modelo.

Entre los procesos que pueden emplearse para el análisis de resultados figuran:

- obtención y comparación de perfiles transversales
- obtención y comparación de planos de isobatas
- identificación, delimitación y volumetría de zonas de depósito y de erosión
- cuantificación de volúmenes y tasas de material sedimentario desplazado
- estimación de Índices de variación de línea de orilla o de depósitos arenosos.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración especial de José Ramón Iribarren y Luis Moreno, Ingenieros del Centro de Estudios de Puertos y Costas en la preparación del presente texto.

REFERENCIAS

- Alien, J. (1974) Scale Models in Hydraulic Engineering Longmans, Green & Co. London, 1974.
- Berenguer, (1980) J. M*Experimentación en modelos físicos Curso Iberoamericano de Puertos. Dirección General de Puertos y Costas. CEDEX. Madrid. 1980.
- Dai, Y.B (1989) Scale effect tests for rubble-mound breakwaters US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Dean, R.G. (1985) Physical Modelling of Littoral Processes en Physical Modelling in Coastal Engineering. R.A. Dalrymple, Ed, A.A. Balkema, Rotterdam, pag. 119-139.
- Ito, M. and Tsuchiya, Y. (1986) Time Scale for Modelling Beach Change, Proceedings, 20 th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers. Taipei, Taiwan, pag. 1196-1209
- Goda, (1976). Suzuki, Y. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments Congress on Coastal Engineering. ASCE,
- Iribarren. (1954). Obras Marítimas. Oleaje y Diques. Madrid.

- Iribarren, J.R.(1994) Experimentación en modelos físicos.Jornadas Hispano-Cubanas de Ingeniería de Costas. La Habana (Cuba). Dirección General de Costas - CEDEX.
- Kamphuis(1975), *J.W.Coastal Mobile Bed Model-Does it Work ?*, Proceedings, Modelling Techniques 75.American Society of Civil Engineers, San Francisco, California, USA, pag. 993-1009.
- Kamphuis, J.W. (1990) *Physical Modelling*, Chapter 21, Vol. 2, en Handbook of Coastal and Ocean Engineering ed J.B. Herbich, Gulf Publishing Company, Houston, Texas, USA, pag. 1049-4066. 1990.
- Komar, P.D. and Miller, M.C (1974) *Sediment Thresold Under Oscillatory Waves Proceedings*, 14th International on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, Copenhagen, Denmark, pag. 756-775.
- Kriebel, D.L., Daily, W.R and Dean, R.G.(1986) *Undistorted Fronde Modelfor Surf Zone Sediment Transpon* Proceedings, 20th International Conference on Coastal Engineering. American Society of Civil Engineers, Taipei, Taiwan, pag. 1296-1310
- Moreno, L., Tamayo, C. and Losada J (1992) *.Mobile Bed Physical Model Tests for the 1992 Olympic Harbor.Proceedings*, V Civil Engineering in the Oceans Conference, American Society of Civil Engineers, College Station, Texas, pag. 840-849.
- Moreno L. (1994) *.Modelos físicos de fondo móvil* Jornadas Hispano-Cubanas de Ingeniería de Costas. La Habana (Cuba). Dirección General de Costas -CEDEX
- Noda, H (1978).*5ca/e RelationsforEquilibrium Beach Profiles* , Proceedings, 16th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Hamburg, West Germany, pag. 1531-1541.
- Saya O, O.J. and Nairn, R.B (1988) *.Physical Modelling of Beach Erosión and Littoral Drift* . Proceedings, 21st International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, Malaga, Spain, pag. 1818-1832.
- Valdes, J.M (1988) Manual de normalización de ensayos Centro de Estudios de Puertos y Costas. CEDEX
- Yalin. M.S.Theory of Hydraulic Models.MacMillan. London 1971.