

Grupos de olas y diseño de diques en talud^(*)

Por JOSEP R. MEDINA

Laboratorio de Puertos y Costas, Dep. de Transportes,
Universidad Politécnica de Valencia.

ROBERT T. HUDSPETH

Ocean Engineering Program, Dep. of Civil Engineering,
Oregon State University, EE.UU.

En las últimas dos décadas se han producido importantes pérdidas económicas por una serie de averías en grandes diques rompeolas de reciente construcción. Este problema reproducido en distintos puntos del planeta evidencia una inadecuada extrapolación de las técnicas de diseño tradicionales a grandes profundidades. Este artículo analiza la problemática del diseño de diques en talud y el estudio de nuevas fórmulas de cálculo y nuevos aspectos del tema. Se describe un proyecto de investigación desarrollado en EE.UU. por los autores para el estudio de la estabilidad de diques a gran profundidad bajo el ataque de grupos de olas generados por los temporales.

INTRODUCCION

La necesidad de abrigo para proteger las operaciones de carga y descarga de embarcaciones ha favorecido a lo largo de los siglos el establecimiento de puertos en cursos fluviales y abrigos naturales. Sin embargo, las necesidades crecientes de zonas portuarias adecuadas y la falta de condiciones naturales ha impulsado la construcción de grandes obras de abrigo para la creación de puertos artificiales.

Se pueden distinguir dos tipos fundamentales de obras de abrigo atendiendo a la respuesta frente al oleaje: los diques verticales (reflejantes) y los diques en talud (rompeolas). Existen además diques mixtos, rompeolas, dispositivos hidráulicos y neumáticos, casi como toda una serie de estructuras y elementos de abrigo que no serán tratados en este artículo. Este trabajo se centra en el estudio de diques en talud que producen abrigo al provocar la rotura del oleaje sobre la propia estructura.

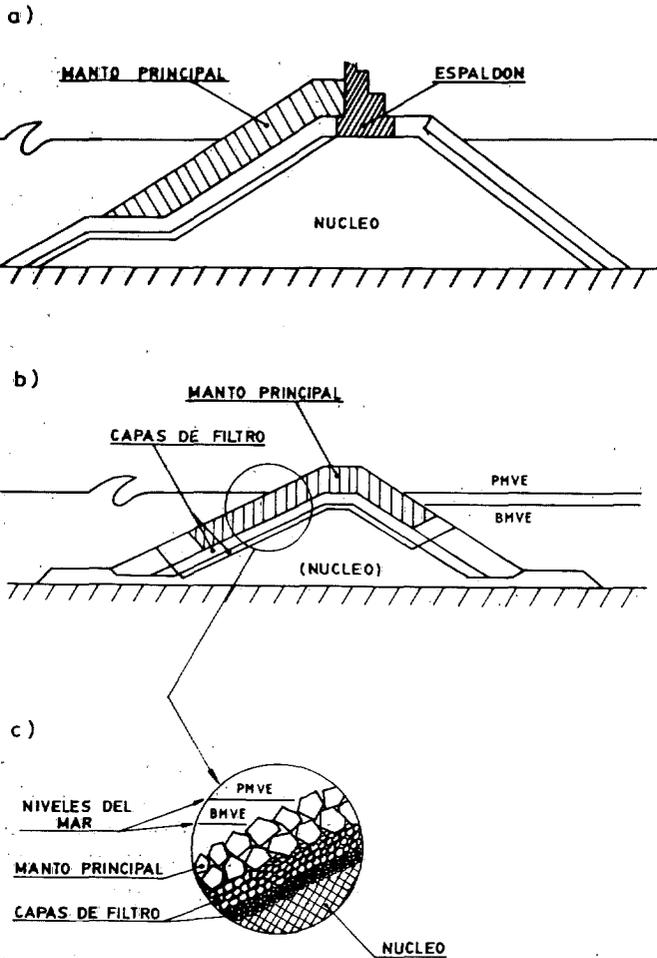
Además de las propias condiciones físicas de la construcción, el diseño de diques de abrigo en distintos países ha sido influenciado por modos técnicos basadas en la experiencia acumu-

lada durante décadas. Así, Goda (1985) señala que las formaciones geológicas y clima húmedo de gran número de islas japonesas (que limitan el tamaño de escollera disponible) y el éxito de los primeros diques verticales favoreció el desarrollo de una tecnología japonesa propia muy contrastada para el diseño y construcción de diques verticales en un amplio rango de profundidades. Al mismo tiempo, Bruun (1985) describe como la destrucción súbita de diques verticales en Occidente, frente al crecimiento gradual de averías mostrado por los primeros diques en talud, favoreció el desarrollo de los diques rompeolas dejando los verticales para zonas de gran profundidad. La experiencia próxima, en el espacio y el tiempo, juega en el diseño de diques un papel muy importante.

Los diques rompeolas convencionales constan fundamentalmente de un núcleo de materiales sueltos (todo-uno de cantera) que constituye la estructura central del dique, y un manto principal que protege el dique de la rotura del oleaje. El manto principal está constituido de escollera o elementos de hormigón de gran tamaño, por lo que resulta necesario disponer de capas intermedias con escollera de tamaño menor para evitar que los elementos pequeños del núcleo salgan de la estructura a través de los huecos en las capas exteriores. En las costas es-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de diciembre de 1989.

GRUPOS DE OLAS Y DISEÑO DE DIQUES EN TALUD



dad (dependiendo de la rugosidad y trabazón de los elementos) son las variables fundamentales que han condicionado tradicionalmente el peso de los elementos del manto.

Desde finales de los 50, un gran número de laboratorios en todo el mundo se dedicaron a desarrollar y patentar nuevos tipos de elementos artificiales para el manto (Tribar, Quadripod, Akmon, Dolo, etc.). El objetivo era conseguir elementos con altos coeficientes de estabilidad para reducir el peso de los elementos del manto y el coste de la estructura. Por otro lado, el desarrollo económico y el aumento del tamaño de los petroleros impulsó la realización de diques rompeolas a profundidades progresivamente mayores. Elementos de muy alto coeficiente de estabilidad, como los dolos, se popularizaron por la aparente mejora económica en la construcción y la fiabilidad de los ensayos que lo apoyaban. La confianza en la técnica tradicional de diseño y en los ensayos escala de los diques propició la base fundamental de los proyectos de diques hasta la década de los 70. La figura 1 muestra dos secciones convencionales de diques en talud, mientras la figura 2 representa algunos elementos artificiales utilizados para el manto principal.

Fig. 1.— Secciones Convencionales de Diques en Talud: a) Sección Tipo Española (Del Moral y Berenguer, 1980); b) Sección Tipo Multicapa del S.P.M. (1984), y c) Detalle del manto.

pañolas, es habitual disponer un espaldón de considerables dimensiones sobre la coronación del dique para reducir el rebase y mejorar las condiciones de construcción y explotación del dique.

El factor de diseño básico para diques en talud es el cálculo del peso de los elementos del manto. Este factor condiciona en gran medida el diseño y coste final de la obra, centrando el máximo interés de ingenieros y científicos que estudian el tema. Fue el español Iribarren (1938) quien publicó la fórmula de cálculo básica que, con ligeras modificaciones (Hudson, 1961), se ha venido utilizando con generalidad hasta la fecha (Shore Protection Manual, 1984). Altura de ola, densidad de materiales y de agua marina, talud del manto y coeficiente de estabili-

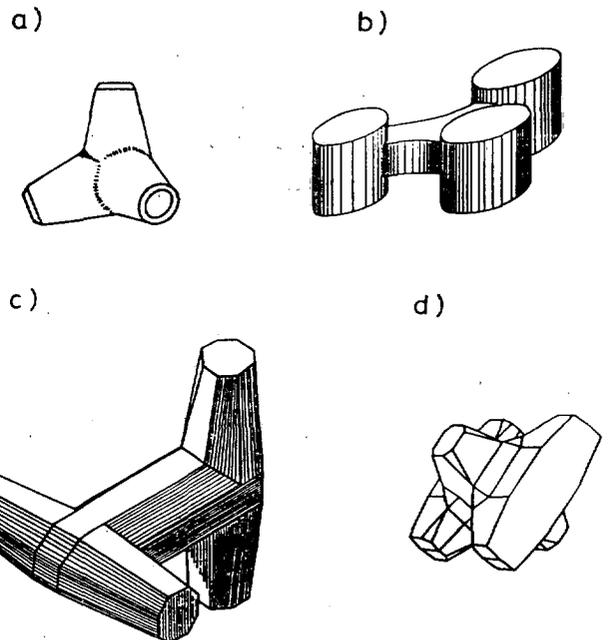


Fig. 2.— Elementos de Hormigón para el Manto Principal: a) Tetrápodo (1950); b) Tribar (1958); c) Dolo (1963) y d) Acrópod (1979).

Durante las últimas dos décadas se han construido un buen número de grandes diques rompeolas en distintos países que han sufrido averías importantes durante la construcción o los primeros años de servicio. El grupo de trabajo del PIANC-PTCII (1985) publicó información de más de 160 rompeolas en su mayoría en los últimos años. Se proporcionó información de 54 diques en talud situados a una profundidad $d > 10$ metros y con temporal de diseño $H_s > 6.5$ metros. El 28 por ciento de estos diques sufrieron graves daños durante los primeros años desde su construcción. Este alto porcentaje se eleva a más del 60 por ciento si se consideran sólo los 11 diques de mayor tamaño ($d > 12$ metros y $H_s > 8.5$ metros). Con ser grave, la situación real puede ser peor de lo que indican estas cifras ya que no están relacionados algunos diques con grandes averías como los de Punta Lucero (Bilbao), Antalya (Turquia) y Trípoli (Libia).

Algunos diques como el de Sines (Portugal), a 50 metros de profundidad, quedaron totalmente destruidos. Otros como el de Punta Lucero (Bilbao), a 35 metros de profundidad, exigieron importantes obras de reparación y refuerzo. Estas experiencias reales significaron el fin de la confianza generalizada y optimista en la extrapolación de técnicas de diseño clásicas a grandes profundidades. La década de los 80 ha estado marcada por las críticas y controversias entre los distintos proyectistas, ingenieros, laboratorios y centros de investigación. Se han analizado las razones del colapso de las técnicas tradicionales de diseño y se busca con avidez una nueva metodología de cálculo y diseño que sustituya eficazmente la anterior.

La situación actual, en 1989, es claramente de transición entre una técnica tradicional que casi nadie defiende y un gran número de nuevas propuestas que no se imponen. El Manual Americano de Protección de Costas (S.P.M.) en su edición de 1984 sigue manteniendo básicamente la fórmula de cálculo de Iribarren -

Hudson sin tener en cuenta el período del oleaje, la duración de los temporales o el efecto de agrupamiento. La necesidad de considerar algunas características específicas del oleaje irregular para modelar correctamente el fenómeno aparece cada año con mayor claridad.

Las alternativas posibles son variadas, discrepantes en algunos casos, y resulta imposible saber qué metodología de diseño acabará por imponerse. Esta situación de inestabilidad está agravada por los intereses económicos en juego que afectan a constructoras, laboratorios y técnicos que tratan de imponer las metodologías y patentes propias.

Dentro de este contexto, en este artículo se describen algunas técnicas de cálculo y diseño de diques sometidas a debate en la actualidad. Se presenta con mayor detalle el problema de la evaluación del efecto de los grupos de olas sobre la estabilidad de diques en talud con especial referencia al experimento desarrollado por los autores en el canal de ensayos de la Oregon State University (EE.UU.).

EL DISEÑO DE DIQUES EN TALUD

La obra de abrigo más común en nuestras costas es el dique en talud o dique rompeolas. Compuesto fundamentalmente por elementos sueltos (escollera, bloques, etc.) esta obra provoca la rotura del oleaje anulando gran parte de su energía. En este capítulo van a describirse secciones tipo y fórmulas de cálculo utilizadas en la actualidad. Por otro lado, la funcionalidad del dique de abrigo en su conjunto dependerá de su disposición en planta, transmisión del oleaje a través del cuerpo del dique, propagación del oleaje desde la bocana, reflexiones múltiples y otros aspectos técnicos que no se van a estudiar en este artículo.

Problema Conceptual

Las cuantiosas pérdidas económicas por las averías en grandes diques durante la década de los 70, atribuidas a una deficiente extrapolación de las técnicas de diseño tradicionales, ha puesto de relieve una serie de defectos de la antigua forma de proyectar diques en talud. Entre los problemas que el diseño tradicional plantea tenemos:

1. El oleaje real es irregular y no regular como se consideraba en las fórmulas y ensayos a escala de Iribarren - Hudson. El número de laboratorios con capaci-

- dad para modelar el ataque de oleaje irregular sobre diques era muy pequeño.
2. El período del oleaje no era considerado en las fórmulas de cálculo más utilizadas.
 3. Los grupos de olas, generadas por el oleaje irregular, no eran considerados en las formulaciones de cálculo tradicionales, ni eran reproducidos adecuadamente en los ensayos físicos.
 4. La duración de los temporales no era considerada, ni reproducida en los ensayos a escala.
 5. La resistencia de los elementos artificiales de hormigón del manto era mal reproducida en los ensayos a escala. La fragilidad de los elementos aumenta con el tamaño y la rotura de algunas unidades frente al oleaje real aceleraba la destrucción del dique (dolos especialmente).
 6. Las condiciones de propagación del oleaje sobre la plataforma continental podían alterar de forma significativa las acciones del oleaje en algunos puntos del dique.
 7. No se consideraban los efectos de la gran incertidumbre que siempre va asociada a la descripción probabilística del clima marítimo a largo plazo.
 8. La permeabilidad del núcleo, que afecta en gran medida la estabilidad de los elementos del manto, era difícil de reproducir a escala en los modelos reducidos.

La construcción de diques en talud a grandes profundidades (oleaje sin limitación de fondo) y para oleajes intensos fue un elemento característico nuevo que liberó simultáneamente los problemas señalados en los puntos 1, 3, 4, 5, 6 y 7, provocando las elevadas pérdidas económicas señaladas anteriormente. Farrow (1988) señala la multiplicación de reclamaciones por daños en los últimos 15-20 años y las dificultades técnicas de los seguros ante la falta de fiabilidad de los diseños actuales.

Este cúmulo de buenas razones para abandonar las técnicas clásicas de diseño de diques rompeolas ha generado un alud de nuevas teo-

rias. En las últimas décadas han sido propuestos nuevos elementos patentados para el manto principal (Robloc, Acropodo, etc.) nuevos conceptos y secciones de dique (perfil en S, dique berma, refuerzo interior del manto, etc) y nuevos materiales y técnicas constructivas (geotextiles, escollera con eje mayor perpendicular al manto, etc). Estas propuestas de diseño intentan cambiar los métodos de trabajo tradicionales. Paralelamente se han desarrollado nuevas técnicas de cálculo y modelación física para la descripción precisa del comportamiento de los diques en talud.

El Shore Protection Manual (1984) describe algunas secciones tipo recomendadas para el diseño de diques en talud. la figura 1-b muestra una sección multicapa propuesta por el Manual Americano de Protección de Costas, mientras que la figura 1-a corresponde a una sección típica de dique en talud proyectado en España

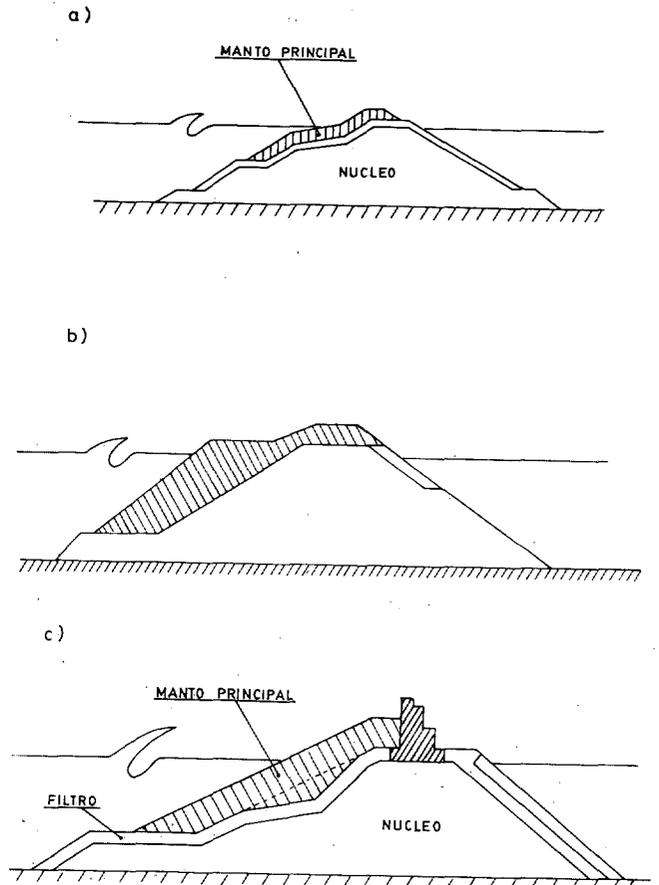


Fig. 3.— Secciones no Convencionales de Diques Rompeolas: a) Perfil en S, b) Dique Berma y c) Dique con Refuerzo interior del Manto.

(Del Moral y Berenguer, 1980). Además de los diques en talud convencionales, durante los últimos años han sido propuestas una serie de secciones que corresponden a conceptos distintos que tratan de reducir el costo de la estructura y aumentar su seguridad. La figura 3-a muestra una sección de dique con Perfil en S o perfil compuesto (Naheer y Buslov, 1983): las ventajas sobre la sección clásica se encuentran en su mayor resistencia a la iniciación de averías y a la rotura total, debido a su perfil suave en la zona de rotura; los inconvenientes son la dificultad de construcción, volumen de materiales y falta de suficientes experiencias reales. La figura 3-b corresponde a la sección tipo de un dique berma o sacrificado (Baird & Woodrow, 1988): la ventaja sobre la sección clásica es el menor costo de construcción en muchos lugares del planeta, debido al menor tamaño de la escollera del manto; los inconvenientes son la movilidad de materiales a lo largo del dique y los problemas de estabilidad y navegación a largo plazo que pueden generarse, así como la falta de suficientes experiencias reales. La figura 3-c representa un dique con refuerzo interior del manto (Medina, 1989): las ventajas sobre la sección clásica se centran en mayor resistencia a la iniciación de averías, una resistencia a la rotura total muy superior y, por tanto, una mayor flexibilidad y capacidad para soportar incertidumbre de cálculo con bajo costo; el inconveniente es la falta de suficientes experiencias reales. Además de los señalados, existen otros diseños no convencionales, como los diques de escollera colocada, de cuenco amortiguador, etc, que tratan de conseguir un mejor comportamiento estructural, funcional, estético, etc. Sin embargo, aunque los nuevos conceptos de dique presentan ventajas teóricas sobre los diseños clásicos en muchas aplicaciones, la falta de experiencia real acumulada hace que las secciones convencionales sigan siendo las construidas habitualmente en las costas de todo el mundo.

Estabilidad Estructural

Garantizar la estabilidad estructural de un dique en talud requiere conocer su comportamiento frente a los posibles mecanismos de fallo. El mecanismo de fallo principal de un di-

que rompeolas es la erosión progresiva del manto principal, por la acción del oleaje, hasta que las capas interiores quedan expuestas y se produce una erosión acelerada y el colapso de la estructura. En el dique rompeolas convencional, la resistencia estructural frente al oleaje aumenta con el nivel de averías del manto hasta un punto máximo en el que la pérdida de materiales altera sensiblemente su configuración reduciendo su resistencia y facilitando una rápida destrucción del dique. La forma del manto principal (taludes y espesores) y el peso y tipo de los elementos del manto son las características básicas del diseño asociados al mecanismo de fallo principal. La respuesta estructural puede describirse con la curva de averías o función de daños del dique (volumen de manto erosionado en función de la intensidad del oleaje).

Además de la erosión del manto por el oleaje, existen otros mecanismos que pueden dañar el dique. Las fuerzas directas sobre el espaldón o sobre su cimentación pueden provocar su deslizamiento o vuelco, con lo que la explotación del dique puede sufrir serias pérdidas. Un rebase excesivo sobre la coronación o espaldón puede erosionar los taludes abrigados del dique con graves daños a la estructura y explotación. Presiones y permeabilidades inadecuadas en el núcleo y capas de filtro pueden generar daños locales en la superestructura y la estabilidad a largo plazo. Las corrientes litorales y la agitación propia del oleaje puede producir erosiones de pie de dique peligrosas para la estabilidad. La falta de capacidad portante del núcleo o de la cimentación del dique puede ocasionar deslizamientos al rebasarse las condiciones geotécnicas de estabilidad. La fluidificación de suelos por la acción cíclica del oleaje y otros fenómenos especiales han sido considerados para el estudio de la estabilidad de diques a largo plazo.

La importancia relativa de cada mecanismo de fallo depende de las condiciones técnicas del proyecto, intensidad del oleaje, profundidad, tipo de suelo, materiales y técnicas de construcción, así como de las condiciones de explotación del dique previstas. Además de los mecanismos de fallo teóricos asociados al diseño conceptual del dique y las acciones ambientales (oleaje, corrientes, etc), es necesario con-

siderar los métodos constructivos, materiales, tolerancias y errores de construcción que se van a producir. Rotura de elementos del manto, menor durabilidad de materiales, espesores de capa variables y otros defectos constructivos pueden afectar sensiblemente la estabilidad del dique durante su vida.

En este artículo se describe el cálculo de secciones convencionales de diques en talud considerando sólo el mecanismo de erosión del manto por la acción del oleaje.

Cálculo de Secciones Convencionales

En Bruun (1985) pueden verse una serie de esfuerzos investigadores dirigidos a conseguir técnicas de diseño de diques en talud que consideren las nuevas variables: período del oleaje, duración de los temporales, grupos de olas, y otros. Lejos de despejar las incógnitas, este agregado de publicaciones ofrece un panorama desalentador al ingeniero que busca soluciones prácticas fiables, aunque por otro lado se estimula la imaginación de los investigadores con un buen número de propuestas. Se insiste en la importancia de los grupos de olas y el período sobre la estabilidad, pero no se aporta una técnica de cálculo fiable que incorpore las nuevas variables y pueda sustituir las viejas formulaciones de Iribarren - Hudson.

Por otro lado y como ya se ha indicado, el S.P.M. (1984) admite la importancia de la aleatoriedad del oleaje pero mantiene la fórmula de Hudson tradicional como técnica de cálculo recomendada. La edición de 1984 altera algunos coeficientes de estabilidad respecto de la edición de 1975, cambiando además la altura de ola equivalente a oleaje irregular (de $H_{1/3}$ a $H_{1/10}$) y ofreciendo con ello una imagen poco tranquilizadora del estado de la técnica actual.

Como punto de referencia para calcular el peso de los elementos del manto principal de un dique en talud puede tomarse la fórmula de Hudson recomendada por el SPM (1984):

$$W = \frac{W_r H^3}{K_D (W_r/W_w - 1)^3 \text{ctg } \alpha} \quad [1]$$

donde W es el peso de los elementos del manto W_w y W_r son los pesos específicos del

agua marina y los elementos del manto, H es la altura de ola de iniciación de averías ($H_{1/10}$), K_D es el coeficiente de estabilidad de los elementos del manto y $\text{ctg } \alpha$ es el talud de la estructura. En profundidades no reducidas, la fórmula de la Eq. 1 puede escribirse en la forma:

$$\frac{H_s}{\Delta D_n} = \left(\frac{K_D}{2} \text{ctg } \alpha \right)^{1/3} \quad [2]$$

donde H_s es la altura de ola significativa de iniciación de averías, $D_n = (W/W_r)^{1/3}$ es el lado del cubo equivalente o diámetro nominal y $\Delta = (W_r/W_w - 1)$. En el caso de utilizar escollera se emplea el subíndice 50 para señalar que se refiere a la mediana de los pesos de la escollera del manto, $D_{n50} = (W_{50}/W_r)^{1/3}$.

Van der Meer (1988a) ha publicado un resumen de trabajos desarrollados en Delft Hydraulics Laboratory (DHL) durante los últimos años donde se propone una nueva fórmula de cálculo. El estudio se basa en la realización de centenares de ensayos en un canal de tamaño medio ($50 \times 1.0 \times 1.2$ m), teniendo en cuenta la gran mayoría de variables que pueden afectar a la estabilidad de un dique de escollera: altura y período del oleaje (irregular), permeabilidad del núcleo, gradación de la escollera, duración de los temporales, agrupamiento de olas, índice de rotura, talud, etc. Algunos factores como agrupamiento de olas y gradación de la escollera fueron consideradas de poca significación presentándose el resto de variables en dos fórmulas de estabilidad dependiendo del tipo de rotura.

Para rotura en «plugging» se propuso:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} (S/N^{0.5})^{0.2} (\xi_z)^{-0.5} \quad [3]$$

y para «surging»

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.02 P^{-0.13} (S/N^{0.5})^{0.2} (\xi_z)^P (\text{ctg } \alpha)^{0.5} \quad [4]$$

donde N_s es el número de estabilidad, P es el coeficiente de permeabilidad de la estructura, N es el número de olas (duración de temporal), $\xi_z = \text{tg } \alpha / (2\pi H_s / g T_z)$ y T_z es el período medio. $S = A/D_{n50}^2$ es el nivel de averías adimensional

nal, donde A es el área erosionada en la sección del dique. La figura 4 muestra un perfil de averías típico de un dique rompeolas. Después de los estudios de estabilidad de diques de escollera, Van der Meer (1988b) ha publicado las formulaciones correspondientes a diques en talud con elementos artificiales. Para los tres tipos de elementos estudiados (cubos, tetrápodos y acrópodos), una sola fórmula particular en cada caso fue considerada suficiente para describir adecuadamente las observaciones de los ensayos a escala.

Cubos: (ctg $\alpha = 1.50$)

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = (6.7 N_0^{0.4} / N_0^{0.3} + 1.0) s_z^{-0.1} \quad [5]$$

Tetrápodos: (ctg $\alpha = 1.50$)

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = (3.75 N_0^{0.5} / N_0^{0.25} + 0.85) s_z^{-0.2} \quad [6]$$

Acrópodos: (ctg $\alpha = 1.33$)

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_n} = 3.7 + 0.8 N_0 ; 0 \leq N_0 \leq 0.5 \quad [7]$$

D_n es el lado del cubo equivalente (denominado también diámetro nominal); N_0 es del daño relativo (número de unidades desplazadas en una anchura D_n), que es 0 para iniciación de averías y 0.5, 1.5 ó 2 para graves daños según tipo de elemento y número de capas. $s_z = 2\pi H_s / gT_z$ es el peralte característico del oleaje.

Las formulaciones presentadas por las ecuaciones 3 a 7 son interesantes por lo que describen, por la forma en que lo hacen y por lo que desprecian. Un mismo autor en una serie de experimentos cambia de variables entre diques de escollera y de elementos artificiales. Así, las variables parámetro de similaridad surf ξ_z y talud ctg α (Ecs. 3 y 4) son cambiadas por el peralte característico s_z y talud fijo (Ecs. 5 y 6), mientras que el nivel de averías adi-

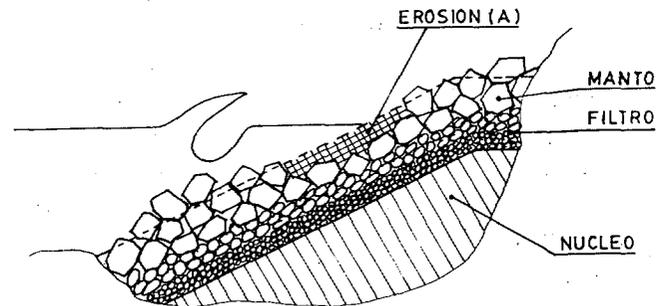


Fig. 4.—Erosión del Manto Principal Producido por un Gran Temporal sobre un Dique Rompeolas Convencional.

mensional S (Ecs. 2 y 3) es cambiado por daño relativo N_0 (Ecs. 5, 6 y 7). Se utilizan estructuras de formulación muy complejas, en comparación con la formulación clásica, y se proponen una diversidad de constantes empíricas (6.2, 0.18, 0.13, 0.85, 0.5, 0.4, 0.3, 0.2, 0.1, 0.25, etc). Por otro lado, en la publicación de Van de Meer y Pilarczyk (1987) se señala que fueron investigadas las variables gradación de la escollera, forma espectral y parámetros de agrupamiento del oleaje sin poder identificar ninguna influencia significativa sobre la estabilidad.

Medina y McDougal (1989) presentan algunas razones críticas para dudar de las conclusiones de Van de Meer (1988). Entre ellas podemos señalar:

1. La dependencia del número de estabilidad $N_s = H_s / \Delta D_n$, respecto de la duración de los temporales en las fórmulas propuestas permitió a Van der Meer (1988a) mostrar una clara diferencia entre las Ecs. 3-4 y la Ec. 1 del S.P.M. (1984). Sin embargo, se utilizó un número de olas distinto para comparar el comportamiento de diques con núcleo permeable e impermeable con lo que las discrepancias quedaron aumentadas de forma arbitraria.
2. Las formulaciones de Van der Meer (1988a) resultan excesivamente complejas y con gran número de coeficientes empíricos para constituir alternativa práctica fiable a la metodología del S.P.M. (1984).
3. El propio Van der Meer (1988a) reconoce que la dependencia del número de olas del temporal (N), en las Ecs. 3 y 4, proporciona valores excesivos para

$N > 7.000$. Medina y McDougal (1989) proponen una formulación intermedia simple representada en la figura 5 que evita este problema y la inconsistencia de la fórmula del SPM(1984). Resulta equivalente a considerar una altura de ola de cálculo en la Ec. 1 que depende de la duración del temporal.

4. La precisión aparente de las nuevas formulaciones puede resultar engañosa ya que una simple imprecisión de 5 por ciento sobre H_s puede producir errores del 20 al 30 por ciento en la estimación del nivel de daños S . Esta imprecisión del 5 por ciento sobre H_s se genera simplemente por no especificar con claridad la definición de altura de ola significativa ($H_{1/3}$, H_{m0} , etc).
5. Van der Meer (1988a) asegura que la forma del espectro y el agrupamiento de las olas no tiene una influencia apreciable sobre la estabilidad del dique. Sin embargo, reanalizados datos adicionales del mismo estudio publicados por Van der Meer y Pilarczyk (1987) se observa con claridad que la estabilidad es mayor frente a los espectros estrechos (grupos grandes). Esto contradice lo intuitivo y la opinión de otros autores que como Bruun (1985) defienden con insistencia la necesidad de considerar los grupos de olas en el diseño de diques en talud.
6. Por último, señalar que se invierte un gran esfuerzo en describir los resultados

de la serie de experimentos pero se dedica muy poca atención a los equipos y la metodología experimental. Por tanto, la aparición de conclusiones controvertidas tiende a reducir la aplicabilidad fiable de los resultados.

Además de lo señalado, el cálculo práctico de secciones de diques en talud convencionales plantea problemas adicionales en utilización de metodologías alternativas. El SPM (1984) utiliza fórmulas, secciones tipo, curvas de estabilidad y definición de nivel de averías distintas de las de Iribarren (1965), comunmente empleadas en España, a su vez distintas de las formuladas por Van der Meer (1988-a,b). Con el mismo oleaje de diseño, se pueden calcular pesos de los elementos del manto significativamente distintos al utilizar unas u otras formulaciones.

Modelación Física

Dado que las fórmulas para el cálculo de los elementos del manto deben utilizarse sólo para un predimensionamiento, lo razonable es pensar que serán los ensayos a escala reducida los que deberán precisar la curva de estabilidad (función de averías) que cabe esperar y, por tanto, el diseño de dique que debe tomarse. Sin embargo, la realidad es mucho más compleja.

En primer lugar, todos los grandes diques con averías de consideración en las últimas dos décadas fueron ensayados a escala con técnicas e hipótesis «razonables» en su momento. Los mismos datos de diseño con nuevas hipótesis y técnicas experimentales demostraron después lo «poco razonables» que eran algunas hipótesis y técnicas utilizadas. Esta situación de incertidumbre técnica no ha terminado y así, Medina (1988) ha mostrado evidencias razonables de que estudios «a posteriori» del desastre de Sines (Portugal, 1978-19-79) parecen tener un dudosa fiabilidad, a pesar de la amplia experiencia acumulada y esfuerzo dedicado al problema.

Por otro lado, las propias técnicas de ensayo con oleaje irregular plantean problemas de difícil solución. En el Seminario sobre Análisis y Generación de oleaje en laboratorio, celebrado durante el XXII Congreso del IAHR en Lausanne (Suiza) en 1987, se presentaron los re-

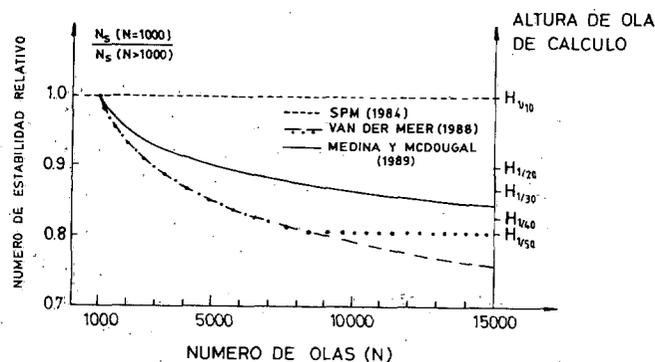


Fig. 5.—Relación entre Número de Estabilidad de 1.000 olas y el Número de Estabilidad Función del Número de Olas Correspondiente a la Metodología del S.P.M. (1984), Van der Meer (1988a) y la Modificada de Medina y McDougal (1989).

sultados del correspondiente Grupo de Trabajo del IAHR formado en 1981 por representantes de nueve de los mayores laboratorios del mundo. Quedaron evidenciados problemas importantes de comunicación derivados de diversos significados de palabras tan comunes como altura de ola significativa. No sólo las palabras, sino también las propias técnicas experimentales eran distintas y así, un primer planteamiento de problemas tipo a resolver por todos dio como resultado valores dispares. Era imperiosa la necesidad de detallar con la máxima precisión parámetros y técnicas de experimentación para poder comparar resultados de distintos laboratorios.

No sólo la metodología de trabajo y el código de comunicación pueden causar diferencias, además existen discrepancias conceptuales que se refieren a la propia esencia de la generación de oleaje irregular. Funke y Mansard (1987) y Huntington (1987) plantearon dos versiones distintas de la generación de oleaje irregular. La discusión se centró en la significación ingenieril del control de grupos para generar acciones extremas sobre las estructuras en modelación física. Funke y Mansard (1987) señalaron cómo un mismo problema práctico de estabilidad de dique en talud, obtuvo resultados radicalmente distintos al ser planteado por un cliente a dos laboratorios que utilizan habitualmente técnicas de generación de oleaje irregular distintas.

La Incertidumbre en el Diseño de Diques

Como se ha señalado anteriormente, la construcción de diques en talud a grandes profundidades (oleaje sin limitación de fondo) y para oleajes intensos ha sido un elemento nuevo característico de muchos de los grandes diques dañados en las últimas dos décadas. Para este tipo de diques ha quedado de manifiesto la necesidad de incorporar un análisis preciso de la incertidumbre climática que afecta directamente el riesgo de la estructura.

Le Méhauté y Wang (1985), así como Medina y Aguilar (1986) presentan un modelo que describe el impacto de la incertidumbre climática sobre el riesgo y coste de los diques en talud a grandes profundidades. Medina (1988) analiza estudios de clima marítimo realizados

para Valencia, Bilbao y Sines resaltando el fuerte impacto que sobre el diseño de diques puede llegar a tener este factor. Van der Meer (1988a) considera de tal importancia este factor que directamente incluye una variable de incertidumbre climática para el diseño de diques basado en métodos probabilistas de riesgo.

Goda (1988) resalta la importancia de la incertidumbre en las estimaciones de clima marítimo a largo plazo y presenta fórmulas empíricas para evaluar la incertidumbre dependiendo del número de años de información marítima disponibles, considerando exactos los datos de partida. Además de la importancia de la incertidumbre climática sobre el coste y riesgo de diques a gran profundidad, existen una variedad de fuentes de incertidumbre (Ver Medina, 1988) que afectan todo tipo de diques, aunque la importancia de cada fuente de incertidumbre es distinta dependiendo de las condiciones específicas de diseño. Así, un dique a gran profundidad es muy sensible a la incertidumbre climática mientras que en el Mediterráneo y a poca profundidad lo es a la marea meteorológica y la erosión del fondo. Una vez más, resulta fácil explicar razones que justifican el elevado número de obras de refuerzo y reparación en diques rompeolas que se realizan cada año. Lo difícil es conseguir una mejora de las técnicas clásicas de diseño que sea efectiva, fiable y que pueda ser aceptada por la mayoría a corto plazo.

GRUPOS DE OLAS SOBRE DIQUES EN TALUD

El efecto de los grupos de olas sobre la estabilidad de diques en talud es uno de los factores que plantea mayor controversia entre las nuevas formulaciones de cálculo. Considerando el oleaje como irregular, parece razonable pensar que la presentación de olas en grandes grupos puede ocasionar mayores daños que en grupos menores.

Bruun (1985) presenta una serie de referencias y observaciones que apoyan la importancia de los grupos de olas y las olas gigantes sobre la estabilidad de diques. Por otro lado, los experimentos y referencias presentados por Van

der Meer y Pilarczyk (1987) apoyan la idea de que los grupos de olas no tienen un efecto apreciable sobre la estabilidad (las olas gigantes ni siquiera son consideradas). Finalmente, Medina y McDougal (1989) han reanalizado los resultados de Van der Meer y Pilarczyk (1987) encontrando una desviación sistemática que apoyaría la idea contraria a la intuición de que los diques en talud son más estables frente a oleajes con espectro estrecho (grandes grupos de olas).

Con el objeto de evaluar con precisión la importancia del efecto de grupo sobre la estabilidad de diques en talud, los autores han realizado una serie de experimentos específicos en el canal de ensayos de la Oregon State University ($103 \times 3.6 \times 4.6$ metros). La base teórica de agrupamiento de oleaje ha sido desarrollada por los autores con financiación del Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la Cooperación Científica y Tecnológica, mientras que los experimentos físicos en EE.UU. han sido posibles gracias a la financiación del Sea Grant Program (NOAA-EEUU) y de la Office of Naval Research (Departamento de Defensa de los EE.UU.).

Experimento

La figura 6 muestra perfil y planta del canal de ensayos de la O.S.U. con un detalle de la sección utilizada en los experimentos. La anchura del canal permitió dividirlo en dos partes (A y B) con una pantalla de madera anclada en el núcleo y utilizar escollera de distinto tamaño (10 y 13 kgs de media) en las secciones A y B. Se utilizó un talud 2:1 con una pequeña berma de pie de dique, escollera del manto coloreada en bandas (para identificar movimientos) y capa intermedia de piedra pequeña (2 kgs de media). Se empleó un núcleo de arena descrito en la figura 6-c protegido con geotextil. Los espesores utilizados en manto y capa intermedia equivalían a dos y tres lados de cubo equivalente de la piedra utilizada en cada capa respectivamente (densidad 2.74). Una serie de jalones de referencia permitieron disponer de un mallado para identificar movimientos rápidos (run-up, etc) que eran registrados por una cámara de video colocado frente al mo-

delo. Hidrófonos situados dentro y fuera de la estructura del dique permitieron grabar sonidos donde podían identificarse los movimientos de la escollera del modelo, que también eran anotados manualmente por un observador visual directo. Una serie de registradores de desplazamientos (ultrasonidos y de presión) situados en el canal, una docena de sensores de presión dentro de la estructura del dique y el equipo auxiliar correspondiente completaban el sistema de seguimiento del modelo durante los experimentos.

La configuración del modelo representada en la figura 6 respondía a las necesidades del experimento de los autores para estudiar el efecto de los grupos de olas sobre la estabilidad del dique rompeolas. Sin embargo, el diseño se realizó conjuntamente con los profesores W.G. McDougal y C.K. Sollit de la O.S.U. que debían desarrollar otro proyecto de investigación dirigido a la obtención de un modelo analítico fiable de estabilidad de los elementos del manto.

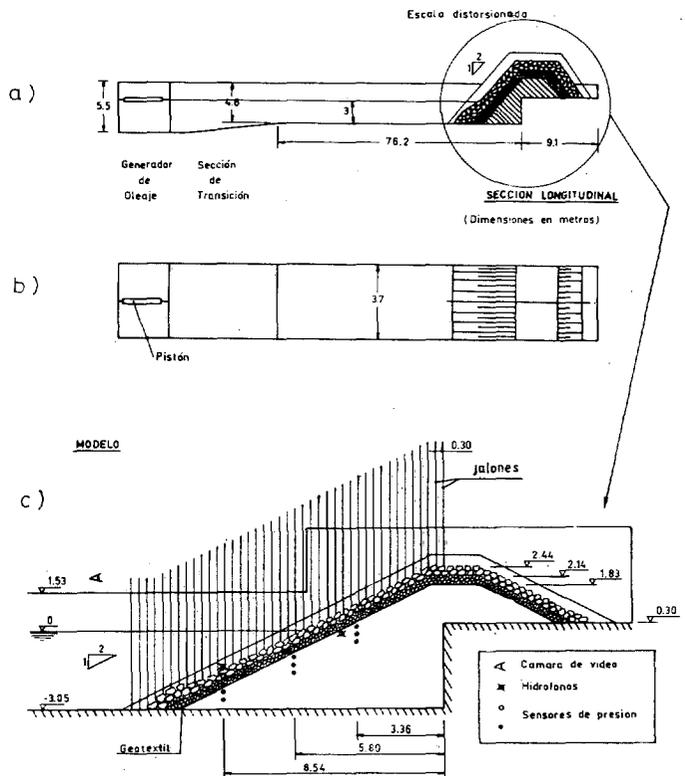


Fig. 6.—Canal de Ensayos de la Oregon State University: a) Sección Longitudinal; b) Planta y C) Detalle del Modelo Ensayado.

La técnica de generación de oleaje utilizada fue la DSA FFT descrita por Tuah y Hudspeth (1982) y Medina et al. (1985) con transformación de control de mecanismo de generación para obtener el oleaje deseado (grupos) a pie de dique. Siguiendo la metodología desarrollada por Medina y Hudspeth (1987) y Hudspeth y Medina (1988), se utilizaron espectros JONSWAP ($\gamma = 10$ y $\gamma = 1$) con período medio $T_{01} = 3$ seg y altura de ola significativa creciente en escalones correspondientes a la raíz cúbica de la proporción de pesos medios de los dos mantos $[(13/10)^{1/3} = 1.09]$. Manteniendo las fases y con energía creciente, se lanzaban sucesivos trenes de 600 olas hasta que la capa intermedia perdía un volumen apreciable de materiales.

Se realizaron simulaciones numéricas correspondientes a $\gamma = 10$ (grupos largos) y $\gamma = 1$ (grupos cortos) seleccionando en cada caso con funciones de altura de ola (envolventes) con alto y bajo parámetro de averías (cálculo numérico exclusivamente). Test con distintas realizaciones pero la misma envolvente fueron ensayadas para comprobar si la envolvente puede explicar los niveles de averías observadas o si era necesario analizar las olas discretas. Se tomaron dos perfiles por sección después de cada tren de ondas (32 minutos) para evaluar el nivel de daños (función de averías) de forma adimensional.

Los resultados están en fase de análisis, pero ya se pueden adelantar algunas conclusiones parciales interesantes desde el punto de vista del diseño experimental y la estabilidad de diques de escollera a gran profundidad.

1. Las averías se producen en el manto en los instantes y con las intensidades relativas aproximadas por las estimaciones numéricas utilizadas (basadas en la envolvente) lo que confirma la importancia de los grupos de olas sobre la estabilidad de los diques en talud.
2. La comparación de los niveles de averías en las dos secciones estudiadas confirma la importancia del peralte específico (períodos del oleaje) sobre la estabilidad de los diques en talud.
3. Resulta evidente la importancia de la du-

ración de los temporales, la variabilidad de potencia intrínseca al oleaje y la incertidumbre climática.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Durante las últimas dos décadas, grandes diques como los de Sines, Bilbao, San Ciprián, Antalya, Arzew y otros han sufrido daños de consideración que han significado elevadas pérdidas económicas y conflictos costosos. Además de los grandes casos presentados a nivel internacional y que son relativamente bien conocidos, existen una multitud de pequeños diques que han sido dañados en mayor o menor grado sin que hayan recibido la publicidad y relevancia de los anteriores. El resultado de esta situación ha sido la falta de confianza generalizada en la utilización de las técnicas tradicionales de cálculo y diseño de diques rompeolas.

Por otro lado, la experiencia general acumulada relativa a la construcción de diques constituye uno de los factores fundamentales de diseño en la práctica. Por esta razón, el fracaso evidente de las técnicas tradicionales de diseño de diques rompeolas no ha significado el desarrollo inmediato de nuevas técnicas de diseño más eficientes. El estado de la técnica actual está caracterizado por la coexistencia de formulaciones y técnicas de diseño múltiples, así como la de opiniones divergentes en cuanto a la importancia relativa de los distintos factores de cálculo y las secciones tipo que deben utilizarse en el futuro. Son gran variedad las secciones tipo, conceptos y fórmulas de cálculo de diques que han sido propuestas como alternativas a las técnicas y diseños clásicos, pero no existe la necesaria experiencia acumulada de construcciones reales para que constituyan alternativas seguras a corto plazo.

En este artículo se han descrito algunos de los problemas de las formulaciones de cálculo tradicionales así como algunas alternativas de diseño planteadas en la actualidad. Se ha presentado el esquema de un proyecto de investigación desarrollado por los autores para analizar el efecto de los grupos de olas sobre la estabilidad de diques en talud. Los resultados preliminares del mencionado proyecto han se-

ñalado con claridad que no sólo la altura de ola significativa del oleaje es importante, también los períodos, duración de los temporales, grupos de olas e incertidumbre del clima marítimo afectan sensiblemente la estabilidad de los diques en talud a gran profundidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero facilitado por el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la Cooperación Científica y Tecnológica, el Sea Grant Program (NOAA— EE.UU.) y la Office of Naval Research (DD— EE.UU.).

REFERENCIAS

1. BAIRD, W. F. y WOODROW, K. W. (1988): «The Development of a Design for a Breakwater at Keflavik, Iceland». **Breakwaters'88**, ICE Eastbourne (U.K.) 111-120.
2. BRUUN, P. (1985): **Design and Construction of Mounds for Breakwaters and Coastal Protection**, Elsevier Publ., Amsterdam, 938 p.
3. DEL MORAL, R y J. M. BERENQUER (1980): **Obras Marítimas**, Servicio de Publicaciones del M.O.P.U., Madrid, 569 p.
4. FÁRROW, M. C. (1988): «Construction Line of Business Manager». **Breakwaters'88**, ICE, Eastbourne (U.K.), 167-174.
5. FUNKE, E. R. y E. P. D. MANSARD (1987): «A Rationale for the Use of the Deterministic Approach to Laboratory Wave Generation». **IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins**, Lausanne (Suiza), 153-195.
6. GODA, Y. (1985): **Random Seas and Design of Maritime Structures**, University of Tokyo Press, 323 p.
7. GODA, Y. (1988): «On the Methodology of Selecting Design Wave Height». **21st ICCE**, ASCE, (próxima publicación).
8. HUDSON (1961): «Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters». **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, ASCE, 126 (IV).
9. HUDSPETH, R. T. y J. R. MEDINA (1988): «Wave Group Analysis by the Hilbert Transform». **21st ICCE**, ASCE, (próxima publicación).
10. HUNTINGTON, S. W. (1987): «A Rationale for the Use of the Probabilistic Approach to Laboratory Wave Generation». **IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Laboratory Basins**, Lausanne (Suiza) 197-208.
11. IRIBARREN, R. (1938): «Una fórmula para el cálculo de Diques de Escollera», *Revista de Obras Públicas*, Madrid, 1938.
12. IRIBARREN, R. (1965): «Formule pour le Calcul des Diques en Enrochements Naturels ou Elements Artificiels». **XXI International Navigation Congress**, Sect. II-I, Stocolmo 1965.
13. LE MEHAUTE, B y S. WANG (1985): «Wave Statistical Uncertainties and Design of Breakwaters», **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, 921-938.
14. MEDINA, J. R. (1988): «Clima Marítimo y Diseño de Obras», **Short Course on Planning and Designing Maritime Structures**, previo al 21st ICCE, Torremolinos (Málaga), 1 - 24.
15. MEDINA, J. R. (1989): **Mejoras Introducidas en el Manto de Diques Rompeolas**. Patente No. P8901204.
16. MEDINA, J. R. y J. AGUILAR (1986): Discusión of «Wave statistical Uncertainties and Design of Breakwater», by B. Le Méhauté and S. Wang, **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, 112 (5) 609 - 612.
17. MEDINA, J. R. y R. T. HUDSPETH (1987): «Sea States Defined by Wave Height and period Functions.» **IAHR Sminar on Wave Analysis**.
18. MEDINA, J. R. y R. T. HUDSPETH (1987): «Sea States Defined by Wave Height and Period Functions». **IAHR Seminar on Wave analysis and Generation in Laboratory Basins**, Lausanne (Suiza), 249 - 260.
19. MEDINA, J. R. y W. G. MCDUGAL (1989): Discussion of «Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armour Layers», by J.W. Van der Meer, **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering** (aceptado para publicar).
19. MEDINA, J. R., AGUILAR, J. y J. J. DIEZ (1985): «Distortions Associated with Random Sea Simulators». **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, ASCE, 111 (4) 603 -628.
20. NAHEER, E. y V. BUSLOV (1983): «On Rubble Mound Breakwaters of Composite Slope». **Coastal Engineering**, 7, 253 - 270.
21. PIANC-PTCII (1985): «The Stability of Rubble Mound Breakwaters in Deeper Water». **Report of a working group of the Permanent Technical Committee II (PIANC)**, Supplement to Bulletin N.º 48 (1985), 28 p.
22. **SHORE PROTECTION MANUAL**, (1984): U.S. Army Corps of Engineers, Vol. II, 1984.
23. TUAH, H. and HUDSPETH, R. T. (1982): «Comparisons of Numerical Random Sea Simulations». **Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division**, ASCE, 108 (WW4), 569 - 584.
24. VAN DER MEER, J. W. (1988a): «Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armour Layers». **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, 114 (1), 66 - 80.

25. VAN DER MEER, J. W. (1988b): «Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode». *Breakwaters'88*, ICE, Eastbourne (U.K.), 59 - 68.
26. VAN DER MEER, J. W. y K. W. PILARCZYK (1987); «Stability of Breakwater Armour Layers. Deterministic and Probabilistic Design». *Delft Hydraulics Communication N.º 378.34p*.

Robert T. Hudspeth.



Profesor en el Departamento de Ingeniería Civil de la Oregon State University en Corvallis, Oregon (EE.UU.), está integrado en la Oregon State University desde 1974 y es Director de la University Research Initiative sobre Ingeniería Oceánica financiada por la Office of Naval Research. Su actividad investigadora fundamental se centra en la hidromecánica estocástica no

lineal del oleaje y del flujo de agua subterránea en medios porosos. Graduado de la U.S. Naval Academy en 1963, consiguió el MSCE de la University of Washington en 1966 y el PhD de la University of Florida en 1974.

Josep Ramón Medina Folgado.



Ingeniero de Caminos, Director del Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia. Doctor por la U.V.P. (1982), es Profesor Titular de Universidad desde 1984 y ha sido Director del Departamento de Transportes y Urbanismo de la UPV desde 1986 a 1989. Profesor de Puertos y Estadística en la Escuela de Caminos de Valencia, su actividad técnica

e investigadora básica se ha centrado en estudios de riesgo estructural, diques en talud, grupos de olas, dinámica de playas, arrecifes artificiales y generación de oleaje en laboratorio. Miembro de la ASCE y la IAHR, ha presentado y publicado sus trabajos en el *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, *Applied Ocean Research* y en otras revistas y congresos internacionales. Es investigador principal o asociado en proyectos para el estudio de grupos de olas, diques en talud y emisarios submarinos, financiados por instituciones españolas y norteamericanas.

