

Influencia de la geometría del morro de los diques en el coeficiente de agitación^(*)

Por C. VIDAL, M. A. LOSADA y J. M. DESIRE
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Se ha realizado una experimentación numérica para tratar de determinar la influencia de la geometría de los morros de los diques en la agitación.

El modelo numérico elegido es un modelo de difracción lineal del tipo «fuentes de ondas» con capacidad para admitir contornos parcialmente absorbentes. Este modelo se ha tarado mediante métodos analíticos y experimentación física en tanque de oleaje.

La experimentación numérica se ha realizado con varias formas de morros cónicos y se ha seleccionado taludes vertical y 2/1. El tamaño relativo de los morros se controla modificando la longitud de onda del oleaje incidente.

Las áreas de estudio del coeficiente de difracción han sido: la zona interior abrigada por el dique, el área de la canal de entrada o área de la boca y el área del talud del morro.

Se ha comprobado que el parámetro más relevante en la difracción en los alrededores del morro es la relación R_c/L (cociente entre el radio del morro al nivel medio y la longitud de onda incidente). En general el comportamiento más homogéneo y conveniente corresponde a los menores valores de R_c/L , es decir, a los morros menores.

En cuanto a la influencia de la forma, especialmente en el caso de las de morro cónico con centro desplazado del eje del dique, su idoneidad depende del área de estudio, aunque, en general los mejores comportamientos se obtienen para los morros menores.

1. INTRODUCCION

Dentro del campo de los diques de escollera o diques rompeolas de materiales sueltos, la definición de la forma del morro y los criterios de estabilidad de las piezas que los componen está sujeta a criterios de construcción de «buena práctica», poco acordes con el avance experimentado en los criterios de estabilidad existente para las secciones rectas del dique. Consciente de esta laguna en el estado del conocimiento, la Dirección General de Puertos y Costas encargó a la Fundación Leonardo Torres Quevedo de la Universidad de Cantabria la realización de un estudio teórico y experimental sobre el tema. El estudio se abordó en la doble vertiente de análisis de la influencia de la geometría del morro en la agitación y en la estabilidad de las piezas que lo componen. El traba-

jo que aquí se presenta corresponde al estudio de agitación.

La experiencia ha demostrado que los morros de los diques son puntos débiles de la estructura, recomendándose el reforzar las secciones en dichas zonas. En esta línea encontramos las recomendaciones de Iribarren (1964), Bruun (1973), Argershou, Sundgren y Sorensen (1983) de aumentar el peso de las piezas del manto principal en el morro de 1,5 a 4 veces. Las estadísticas de diques construidos hasta la fecha siguen estas recomendaciones, Benasai (1984).

En cuanto a la influencia de la geometría del morro en la agitación, existe muy poca bibliografía específica, pudiéndose destacar el trabajo de Kato y Uekita (1971), en el que se miden experimentalmente las diferentes agitaciones producidas en una dársena protegida por un dique vertical impermeable o por un dique de escollera. Como conclusión, se puede destacar el incremento de agitación que produce el dique

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1990.

de escollera en la canal de entrada sobre el dique vertical, situación que se invierte al considerar la agitación a sotavento del dique. No se encuentra en la bibliografía trabajos específicos para determinar el diseño de los morros en función de la agitación.

En la primera parte de este trabajo, se realiza un planteamiento general del problema definiéndose las geometrías de los morros, áreas de estudio y el método de trabajo utilizado.

El estudio de la agitación alrededor del morro de los diques se realiza utilizando un modelo numérico de difracción del tipo de «fuentes de ondas», que como se indica en el apartado 3, se considera el más adecuado para este tipo de análisis. El modelo numérico se contrasta con ensayos en modelo físico para definir su rango de aplicación.

En el apartado 4 se presentan los resultados del análisis de la agitación en las áreas de estudio y se analiza la influencia de los parámetros no contemplados en el modelo numérico. Por último, las conclusiones se muestran en el apartado 5.

2. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA

2.1. Parámetros y formas geométricas

El análisis de agitación se ha realizado estudiando la influencia de los diferentes parámetros del dique y del medio, mediante simulación numérica. Para limitar el número de simulaciones, es necesario definir claramente cuáles son los parámetros que se consideran relevantes en el fenómeno que se estudia.

Para la definición del oleaje que aborda el dique, se ha considerado de utilidad, por la sencillez de interpretación de los resultados, el trabajar con oleaje regular. Esta elección permite utilizar una escala de longitudes basada en la longitud de onda, L , que facilita la reducción del número de parámetros a considerar. Para la definición del oleaje bastará determinar el período, T , la profundidad del agua, h y la dirección de incidencia con el dique, β . Como el modelo numérico empleado es lineal, la altura de ola no tiene influencia en el coeficiente de agitación.

El problema fundamental que se plantea a la hora de determinar la influencia de la geometría de los morros de los diques en la agitación, es la necesidad de limitar el número de opciones posibles.

La geometría básica que se ha utilizado es un dique de talud liso constante e impermeable. Los taludes seleccionados son el vertical y $\cotg \alpha = 2$, siendo α el ángulo del talud con la horizontal. Los morros son cónicos o cilíndricos circulares con el mismo talud que el dique y planta variable.

En la figura 1 se presenta las geometrías básicas utilizadas. La parte superior de la figura muestra una disposición de morro simétrica, con el centro del cono sobre el eje del dique, denominada Forma I. La parte inferior corresponde a una disposición del centro del cono del morro desplazada del eje del dique. Si el oleaje proviene de la parte superior de la figura, la denominamos Forma II y si viene en sentido opuesto, Forma III.

De esta manera, se adoptan los siguientes parámetros para definir la geometría del morro: el talud de manto, $\cotg \alpha$, el radio al nivel del agua, R_c , y el desplazamiento del centro con respecto al eje del dique, S .

De acuerdo con lo expuesto en los párrafos anteriores, el coeficiente de agitación en un punto en las proximidades del dique, sometido a la acción de un oleaje regular es una función de los siguientes parámetros:

- Parámetros del oleaje incidente:
 - Período T o longitud de onda L .
 - Profundidad en el área de propagación, h .
 - Ángulo de incidencia con el dique, β .
- Parámetros geométricos del dique:
 - Distancia del centro del cono al eje del dique, S .
 - Radio del cono al nivel del agua, R_c .
 - Talud del morro, $\cotg \alpha$.

El coeficiente de agitación C_n , se puede expresar como:

$$C_n = f(L, h, S, R_c, \cotg \alpha, \beta)$$

Que podemos poner, en forma adimensional:

$$C_n = f(h/L, S/L, R_c/L, \cotg \alpha, \beta) \quad (1)$$

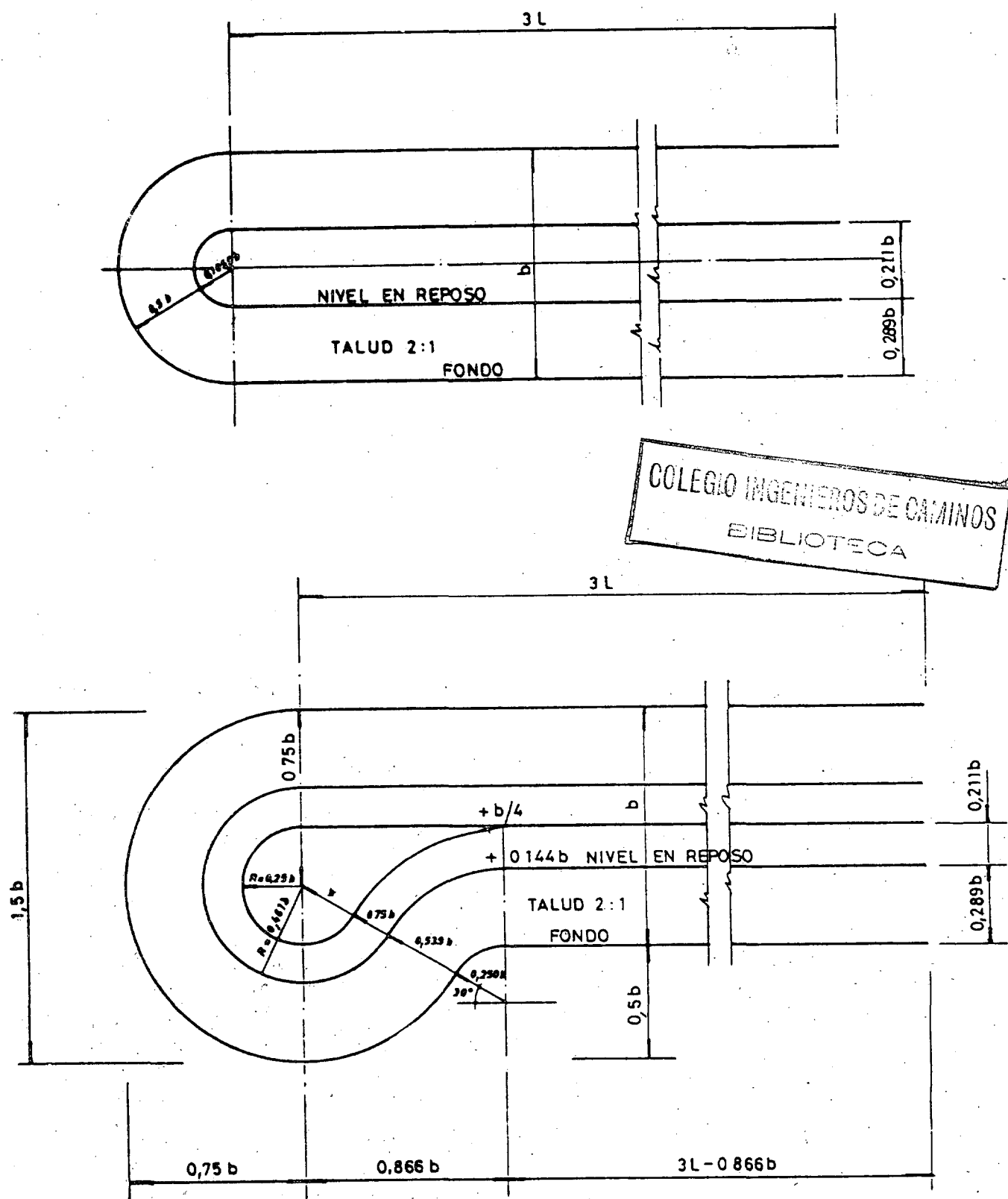


Figura 1

TABLA 1: VALORES DE LOS PARAMETROS UTILIZADOS EN LA SIMULACION NUMERICA

T(s)	L(m)	h/L	S/L	R _c /L	cotg α	β
1,8	2,72	,0957	,162	,302	0 y 2	90 y 60
1,8	2,72	,0957	,000	,140	0 y 2	90 y 60
1,8	2,72	,0957	-,162	,302	0 y 2	90 y 60
2,0	3,06	,0851	,144	,268	0 y 2	90 y 60
2,0	3,06	,0851	,000	,124	0 y 2	90 y 60
2,0	3,06	,0851	-,144	,268	0 y 2	90 y 60
2,2	3,39	,0767	,130	,242	0 y 2	90 y 60
2,2	3,39	,0767	,000	,112	0 y 2	90 y 60
2,2	3,39	,0767	-,130	,242	0 y 2	90 y 60
2,6	4,04	,0643	,109	,203	0 y 2	90 y 60
2,6	4,04	,0643	-,109	,203	0 y 2	90 y 60
3,0	4,70	,0554	,094	,175	0 y 2	90 y 60
3,0	4,70	,0554	-,094	,175	0 y 2	90 y 60

En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros que se han empleado en la simulación numérica. La razón del rango de variación del parámetro h/L está basada en consideraciones de tipo numérico que se explicarán en el apartado 3 dedicado al modelo. El resto de los rangos de los parámetros se eligen de manera que estén dentro de los habituales en la práctica constructiva.

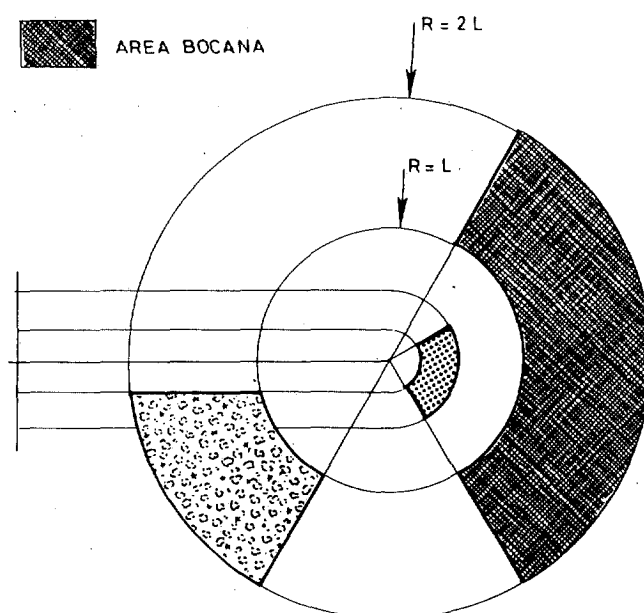
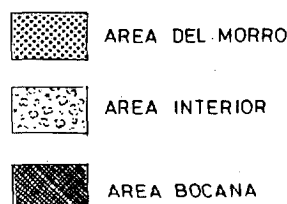
2.2. Definición de las áreas de estudio

Se definen tres áreas de estudio para la agitación: área interior, área de la bocana y área del talud del morro. Los límites de estas áreas son los siguientes:

— Área de estudio: Se define por el círculo de radio 2L y centro en la proyección del centro del cono del morro sobre el eje del dique, figura 2. El origen de ángulos corresponde a la recta prolongación del eje del dique, para el área interior y para la de la bocana. Para el área del talud del morro, el origen de ángulos corresponde a una recta que pasa por el centro del morro y es perpendicular al vector número de onda del oleaje incidente. El sentido positivo de los ángulos es el horario.

— Área interior: Es la comprendida entre los 105° y los 180° del área de estudio y los radios L y 2L, figura 2.

— Área de la bocana: Es la comprendida entre los ángulos -60° y 60° y los radios L y 2L del área de estudio, figura 2.


Figura 2

— Área del talud del morro: Es el área situada sobre el talud del morro y comprendida entre los ángulos -30° y 45°, con la convención de ángulos indicada en el párrafo de «Área de estudio», figura 2.

2.3. Método

El análisis de agitación se ha realizado mediante un modelo numérico de difracción lineal. Dado que estos modelos no tienen en cuenta la variación del vector número de onda al cambiar la profundidad (refracción), la agitación sobre el talud del dique experimentará una desviación sobre la real que será más acusada contra mayor sea el parámetro (h/L) cotg α .

Debido a lo anteriormente expuesto, la primera etapa del trabajo ha consistido en la validación del modelo numérico, tanto en lo referente a la optimización de la facetación de la estructura como a la definición del grado de aproximación en función de los taludes y longitudes de onda.

Para la validación del modelo se han utilizado las soluciones analíticas para cuerpos sen-

INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA DEL MORRO DE LOS DIQUES EN EL COEFICIENTE DE AGITACION

cillos existentes en la literatura y modelos físicos en tanque de oleaje.

Una vez validado el modelo numérico, se ha procedido a explotar éste, aplicándolo a los casos que se indican en la Tabla I. Obtenidos los coeficientes de agitación en el área de estudio, se define el método de evaluación de la agitación cada una de las áreas indicadas en el apartado anterior.

Las agitaciones obtenidas para cada área se representan y analizan en función del tamaño relativo del morro, para cada tipo de estructura.

3. MODELO NUMERICO DE DIFRACCION

Este modelo resuelve la propagación de un oleaje monocromático en **profundidad constante**, influenciado por la presencia de un obstáculo cerrado (difracción pura).

El método empleado para su solución es el de las funciones fuentes, descrito por primera vez por Lamb (1956), en el que se supone que cada punto del obstáculo es un foco emisor de ondas, con período el del oleaje incidente y amplitud incógnita. El desarrollo numérico del modelo se encuentra bien definido en la literatura existente. Nosotros seguiremos aquí la metodología seguida por Sarpkaya (1981).

3.1. Ecuaciones básicas

Sea un fluido en movimiento en una región R_0 , limitada por un fondo constante e impermeable de profundidad h y en la que existen una serie de obstáculos fijos de contornos S_{ti} totalmente reflejantes y S_p parcialmente reflejantes.

Suponiendo un fluido irrotacional, no viscoso e incompresible, el movimiento de dicho fluido estará caracterizado por un potencial de velocidades $\Phi(x, y, z, t)$ que satisface la ecuación de Laplace en la región R_0 :

$$\nabla^2 \Phi = 0 ; \text{ en } R_0 \quad (3.1)$$

Donde la velocidad del fluido viene dada por:

$$u = (u, v, w) = \nabla \Phi \quad (3.2)$$

El potencial de velocidades deberá satisfacer ciertas condiciones de contorno en el lecho, su-

perficie libre, superficie de los obstáculos y en el infinito:

— Condición cinemática de superficie libre:

$$n_t + \Phi_x \Omega_x + \Phi_y \Omega_y = \Phi_x ; \quad \text{en } z = \Omega(x, y, t) \quad (3.3)$$

— Condición dinámica de superficie libre:

$$\Phi_t + g\Omega + (V\Phi \cdot V\Phi)/2 = 0 ; \quad \text{en } z = \Omega(x, y, t) \quad (3.4)$$

— Condición de fondo horizontal impermeable:

$$\Phi_x = 0 ; \text{ en } z = -h \quad (3.5)$$

— Condición de reflexión total o parcial sobre los obstáculos limitados por S_{ti} o por S_{pi} respectivamente:

$$\Phi_{ni} = 0 ; \text{ en } S_{ti} \quad (3.6)$$

$$\Phi_{ni} = -i\alpha_i k \Phi ; \text{ En } S_{pi} \quad (3.7)$$

Donde:

x, y, z = Variables espaciales.

t = Variable tiempo.

u, v, w = Componentes del vector velocidad.

Ω = Superficie libre.

n_i = Normal al contorno S_{ti} o S_{pi} .

k = Módulo del vector de onda.

α_i = Coeficiente de amortiguación real
 $0 \leq \alpha_i \leq 1$.

∇ = Operador gradiente.

∇^2 = Operador Laplaciano.

$i = \sqrt{-1}$.

Los subíndices indican derivación parcial.

3.2. Resolución del sistema

El método empleado para la resolución de la ecuación 3.1 consiste en expresar el potencial incidente Φ en forma compleja, separando la dependencia temporal de la espacial:

$$\Phi(x, y, z, t) = R_0 \{ \Phi(x, y, z) \cdot e^{-i\omega t} \} \quad (3.8)$$

El potencial espacial Φ se descompone a su vez en un potencial incidente, Φ_w y un potencial dispersador Φ_z :

$$\Phi = \Phi_w + \Phi_z. \quad (3.9)$$

Ambos potenciales deberán cumplir las con-

diciones (3.1) a (3.5). El potencial total ϕ deberá cumplir la condición (3.6) o (3.7) según el tipo de contorno de los obstáculos. Por último, el potencial dispersado debe cumplir la condición de radiación nula en el infinito, en el supuesto de que los obstáculos son de dimensión finita:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R^{1/2} (\phi_{zr} - ik\phi_z) = 0; \quad (3.10)$$

Donde $R = \sqrt{x^2 + y^2}$ (distancia radial al origen de la perturbación).

Una solución al primer orden para el potencial incidente en un punto x , viene dada por la forma compleja de la onda lineal:

$$\phi_w(x) = \frac{-igH}{2w} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \exp \{ik(x \cos \beta + y \sin \beta)\} \quad (3.11)$$

Donde:

H : Altura de ola.

w : Frecuencia angular = $2\pi/T$

β : Angulo que forma el eje x positivo con la normal al frente.

x : (x, y, z) , vector de posición del punto.

El potencial dispersado se representa como una suma de fuentes de ondas de intensidad f , repartidas por la superficie de los obstáculos:

$$\Phi_m(x) = \frac{1}{4\pi} \int_S f(\sigma) G(x, \sigma) dS \quad (3.12)$$

Con:

$\sigma = (\sigma, \Gamma, \mu)$, coordenadas del foco emisor.

$G(x, \sigma)$: Función de Green que proporciona el potencial en el punto x generado por una fuente de intensidad unitaria localizada en σ .

S : Superficie del contorno.

Una definición de la función G fue dada por John (1950), pudiéndose expresar tanto en forma de integral como de serie.

De lo visto anteriormente, resulta que el potencial dispersado se encuentra totalmente resuelto salvo el conocimiento de la función $f(\sigma)$. Esta función se determina planteando las condiciones de contorno total o parcialmente reflejante (3.6 o (3.7):

— S totalmente reflejante:

$$\phi_n = \phi \rightarrow \phi_{wn} = -\phi_{zn} \quad (3.13)$$

— S parcialmente reflejante:

$$\phi_n = -ix_k k \phi \rightarrow \phi_{wn} + \phi_{zn} = -ik\alpha_i (\phi_w + \phi_z) \quad (3.14a)$$

En lo sucesivo, sólo desarrollamos la condición (3.13) de reflexión total sobre el obstáculo. El desarrollo de la condición (3.14a) se puede encontrar en Behrendt (1985). La relación entre el coeficiente de absorción y el coeficiente de reflexión es:

$$R = (1 - \alpha)/(1 + \alpha) \quad (3.14b)$$

Una forma posible de aplicar la ecuación (3.13) a la solución del problema es la discretización de la superficie S en elementos o facetas representados por su área S_i , coordenadas de su centroide σ_i y normal n y sobre los cuales se supone la intensidad de la fuente constante.

Suponiendo la superficie S dividida en N facetas, la ecuación (3.13) se puede discretizar de la forma:

$$\sum_{j=1}^N B_{ij} f_j = b_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.15)$$

Donde:

$$B_{ij} = \sigma_{ij} + G_{ni}(X_i, \sigma_j) S_j / 2\pi \quad (3.16)$$

$$G_{ni} = G_x n_x + G_y n_y + G_z n_z$$

n_x, n_y, n_z : Componentes del vector normal unitario, positivo hacia el exterior de la estructura, de la faceta i -ésima.

$$b_i = -\phi_{wni}(x_i) \quad (3.17)$$

Esto hace posible la evaluación de la matriz B_{ij} y del vector b_i , y por lo tanto, la obtención del vector f_i por cualquiera de los métodos de resolución de sistemas:

$$[f_j] = [B_{ij}]^{-1} [b_i] \quad (3.18)$$

A partir de aquí el problema queda completamente solucionado, pues:

$$\phi_z(X_i) = \sum_{j=1}^N A_{ij} f_j \quad (3.19)$$

Donde:

$$A_{ij} = G(x_i, \sigma_j) S_j / 4\pi \quad (3.20)$$

Obtenido el potencial dispersado ϕ_z , el problema de la obtención de ϕ queda resuelto, y en particular se podrán obtener la amplitud del movimiento de la superficie libre Ω_{max}

y la fase τ en cualquier punto de la región R_0 de trabajo. El coeficiente de agitación en un punto se define como la relación entre la altura de onda en ese punto y la altura de la onda incidente:

$$C_{ai} = 20_{\max i} / H \quad (3.21)$$

3.3. Tarado y puesta a punto del programa

Para obtener un máximo aprovechamiento del programa realizado y acortar su campo de aplicación se ha seguido la siguiente metodología:

- Comparación de los resultados del modelo numérico con la solución teórica para cilindro vertical MacCamy y Fuchs (1954).

- Comparación con los resultados de un modelo físico de un cilindro vertical impermeable, en tanque de oleaje.

El tarado del modelo numérico se ha realizado fundamentalmente en tres variables: profundidad relativa, tipo de facetación y precisión de los cálculos.

Para la comparación de los resultados obtenidos para el coeficiente de agitación entre el modelo numérico y los modelos analíticos o los físicos se define un error cuadrático medio:

$$E = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N (C_{ani} - C_{ami})^2 / N \right)} \quad (3.22)$$

Donde:

C_{ani} : Coeficiente de agitación obtenido por el modelo numérico en el punto i .

C_{ami} : Coeficiente de agitación obtenido por el modelo analítico o físico, según el caso, en el mismo punto i .

N : Número de puntos de cálculo de los coeficientes de agitación.

Las conclusiones son las siguientes:

- a) Validez en términos de profundidad relativa.

Independientemente de consideraciones de facetación, se ha determinado que la mejor zona de funcionamiento del modelo es la situa-

da en profundidades intermedias, con un error medio situado entre el 1,5 y el 5 por 100. Un comportamiento igualmente bueno se puede obtener para profundidades indefinidas (entre el 3 y el 5 por 100 de error medio) si bien la misma precisión exige elevar notablemente el número de facetas y por lo tanto, el tiempo de ejecución.

En profundidades reducidas se observa un incremento muy notable en el error medio (en torno al 15 por 100 en los casos estudiados), sin embargo, si desechamos los valores situados junto al contorno del cuerpo, el error medio desciende considerablemente, quedando reducido a un 5 por 100 aproximadamente.

- b) Validez en términos del número y tipo de facetas.

En términos generales se puede decir que con facetas de dimensiones en torno al octavo de la longitud de onda se obtiene un resultado relativamente correcto (errores del orden del 3 por 100).

- c) Validez en términos de precisión en los cálculos.

La mejora introducida al disminuir el error admisible en los cálculos es baja comparada con la precisión final obtenida, pudiendo admitirse como bueno un error parcial del mismo orden del que se desee para el resultado final.

En cuanto a la comparación entre el modelo analítico y el modelo físico, el error medio obtenido es del 3 por 100, del mismo orden que el modelo numérico y en todo caso, plenamente aceptable.

3.4. Campo de validez en el caso de estructuras en talud

En el apartado anterior se ha validado el modelo para condiciones acordes con las que se expresan en las ecuaciones que resuelve. Ello hace que con una buena estructura numérica, expresada en términos de una facetación adecuada y siempre que nos encontremos en profundidades intermedias o indefinidas, sea posible alcanzar errores perfectamente admisibles.

Dado que la radiación de ondas por la superficie facetada se propaga teóricamente sobre fondo constante, es de suponer que el mode-

lo sea progresivamente menos aproximado a medida que el talud del cuerpo radiante sea más tendido en relación con la longitud de onda, es decir, a medida que los cambios de celeridad sobre el talud (refracción) y la deformación debida al talud (asomeramiento) se hagan más importantes. Por otro lado, estos efectos se harán notar más claramente sobre y en las cercanías del talud que en puntos alejados de éste.

Para el estudio del campo de validez del modelo numérico en el caso de estructuras con talud, se ha realizado una experimentación física en el tanque de oleaje con una estructura cónica.

El error cometido en el cálculo del coeficiente de difracción por el modelo numérico será una función del tipo:

$$E = f(L, h, \tan \alpha, R)$$

Esta función se puede expresar en términos adimensionales como

$$E = f(h/L, \tan \alpha, R/L) \quad (3.23)$$

La influencia de h/L y la pendiente del talud se puede englobar en un solo parámetro de «asomeramiento», Svendsen (1980), δ :

$$\delta = h/L \cotg \alpha \quad (3.24)$$

De esta manera:

$$E = f(\delta, R/L) \quad (3.25)$$

El modelo físico empleado es un cono de chapa de talud $\cotg \alpha = 2$. El cono se centra en dos mallas, una interior y otra exterior, sobre la que se efectúan las medidas de la superficie libre mediante sensores capacitivos. El coeficiente de agitación en cada punto de la malla se determina dividiendo la altura de ola obtenida en cada punto con y sin la presencia del cono, para una misma señal de oleaje enviada al pistón generador.

Utilizando los resultados del coeficiente de difracción obtenido de los ensayos del modelo numérico, se ha calculado los errores medios y las desviaciones típicas para cada período, en función de la distancia adimensional R/L al centro del cono.

En la figura 3 se ha dibujado la variación del error medio en todo el campo con el parámetro δ . En la figura queda clara la influencia de

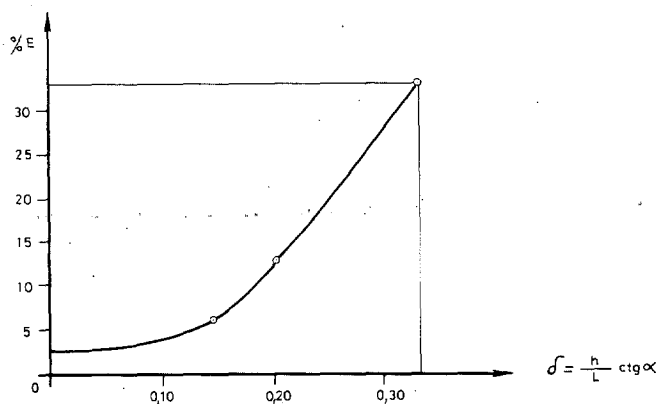


Figura 3

δ en la precisión del modelo numérico. La figura 3 permite acotar δ para un valor medio relativo del modelo numérico. Si se admite un valor límite del error del 10 por 100, se debe cumplir:

$$\delta < 0,18 \quad (3.26)$$

4. ESTUDIO NUMERICO DE LA INFLUENCIA DE LA GEOMETRIA DEL MORRO EN LA AGITACION

Una vez puesto a punto el modelo numérico de difracción y obtenido su campo de validez en el caso de estructuras en talud, se ha procedido a su explotación para el estudio de la influencia de la forma de los morros de los diques en la agitación en tres áreas indicadas en el apartado 2.2.

4.1. Definición geométrica de las formas del morro

Se estudian las tres formas básicas, definidas en el apartado 2.1 y en la figura 1: morro cónico simétrico (forma I), cónico con avance hacia tierra (forma II) y cónico con avance hacia el mar (forma III), con las variantes de talud vertical y 2:1.

Los ángulos de incidencia del oleaje son dos: perpendicular al eje del dique (90°) y oblicuo a 60° . Los períodos seleccionados son cinco: 1,8, 2,0, 2,2, 2,6 Y 3,0 seg., con una profundidad de $h = 0,26$ m, de manera que el error

previsto del modelo numérico sea inferior al 12 por 100. Los períodos de 2,6 y 3 sólo se ensayan para las formas II y III. Los valores del parámetro δ , para el caso de talud 2:1 ($\cotg \alpha = 2$) son los indicados en la Tabla 2:

TABLA 2: VALORES DEL PARAMETRO δ Y ERROR PREVISIBLE DEL MODELO NUMERICO

T (s)	L (m)	h/L	δ	Error %
1,8	2,72	0,0957	0,1912	11
2,0	3,06	0,0851	0,1705	8
2,2	3,39	0,0767	0,1534	6
2,6	4,04	0,0643	0,1287	5
3,0	4,70	0,0554	0,1106	4

Cuando la incidencia del oleaje es muy oblicua, zonas a sotavento del morro y del dique, el parámetro δ se sale fuera del rango de aplicación del modelo, en el caso de considerar la pendiente del talud en la dirección de avance de la onda. Como el talud en estas zonas no influye en los resultados en las áreas de estudio, se realiza una transición suave del talud 2:1 del morro a un talud vertical en la parte abrigada del dique.

Como no es posible definir un dique de longitud infinita, los diques que se simulan son diques exentos de longitud $6L$, doble de la indicada en la figura 1, en la que sólo se representa una mitad simétrica. Para el caso de incidencia oblicua sobre el eje del dique, se mantiene la simetría con respecto al eje x , girándose 30° el dique en sentido horario. La facetación en este caso es similar, aunque el giro obliga a deformar las facetas que entroncan con el eje x .

La malla de resultados es circular, con centro en el centro del área de estudio y radio máximo $2L$. Los resultados se obtienen sobre radios cada 30° y a distancias de $L/8$ sobre cada radio.

4.2. Análisis de los resultados

Analizaremos seguidamente la difracción producida por los diques definidos en la figura 1. En la figura 4 se muestra, a modo de ejemplo, una presentación gráfica de resultados del coeficiente de agitación. Se presentan los resultados de la influencia de la forma, talud, período

y ángulo de incidencia en la agitación interior, en la bocana y en el talud del morro.

Agitación interior.

Para este trabajo, se calcula el coeficiente de agitación medio en el área interior, C_{ai} . En las figuras 5 y 6 se representa el coeficiente C_{ai} en función de la relación $2R_c/L$.

Como se observa en la figura 5, en el caso de incidencia normal, la agitación interior aumenta ligeramente a medida que disminuye el tamaño relativo del morro $2R_c/L$. Comparando los resultados para taludes diferentes e igual forma, en la forma I, la agitación para talud 2/1 es superior que para talud vertical, para la forma II es el talud 2/1 el que da menor agitación y en la forma III los resultados obtenidos son similares para talud vertical y 2/1.

Analizando comparativamente las formas, la II ofrece claramente una menor agitación interior que la III. A efectos de agitación interior, las formas I y II son similares.

En el caso de incidencia a 60° , figura 6, para las formas I y II y talud vertical, el comportamiento con $2R_c/L$ es el mismo que en el caso de incidencia normal, es decir, la agitación disminuye al aumentar el tamaño relativo del morro. En el caso de las formas I y II con talud, aparece un mínimo de agitación alrededor de $2R_c/L = 0,4$. La forma III da valores de agitación interior crecientes con $2R_c/L$ para el caso de talud vertical y menores para el caso de talud 2/1. En este caso, las diferencias, para diques en talud entre las formas III y II son pequeñas. La mayor protección debida a la incidencia oblicua se manifiesta con valores de C_a inferiores a los de incidencia normal, siendo la diferencia mayor en cuanto menor es el tamaño relativo del morro.

Agitación en la bocana.

Definimos el coeficiente de agitación en la bocana, C_{ab} , como la media de los coeficientes de difracción máximos en cada radio de la malla de resultados en el área de la bocana definida en el apartado 2.2.

Para el análisis de los resultados, se representan los coeficientes C_{ab} en función del tamaño relativo del morro, $2R_c/L$. En el caso de incidencia normal y para las formas I y II, fi-

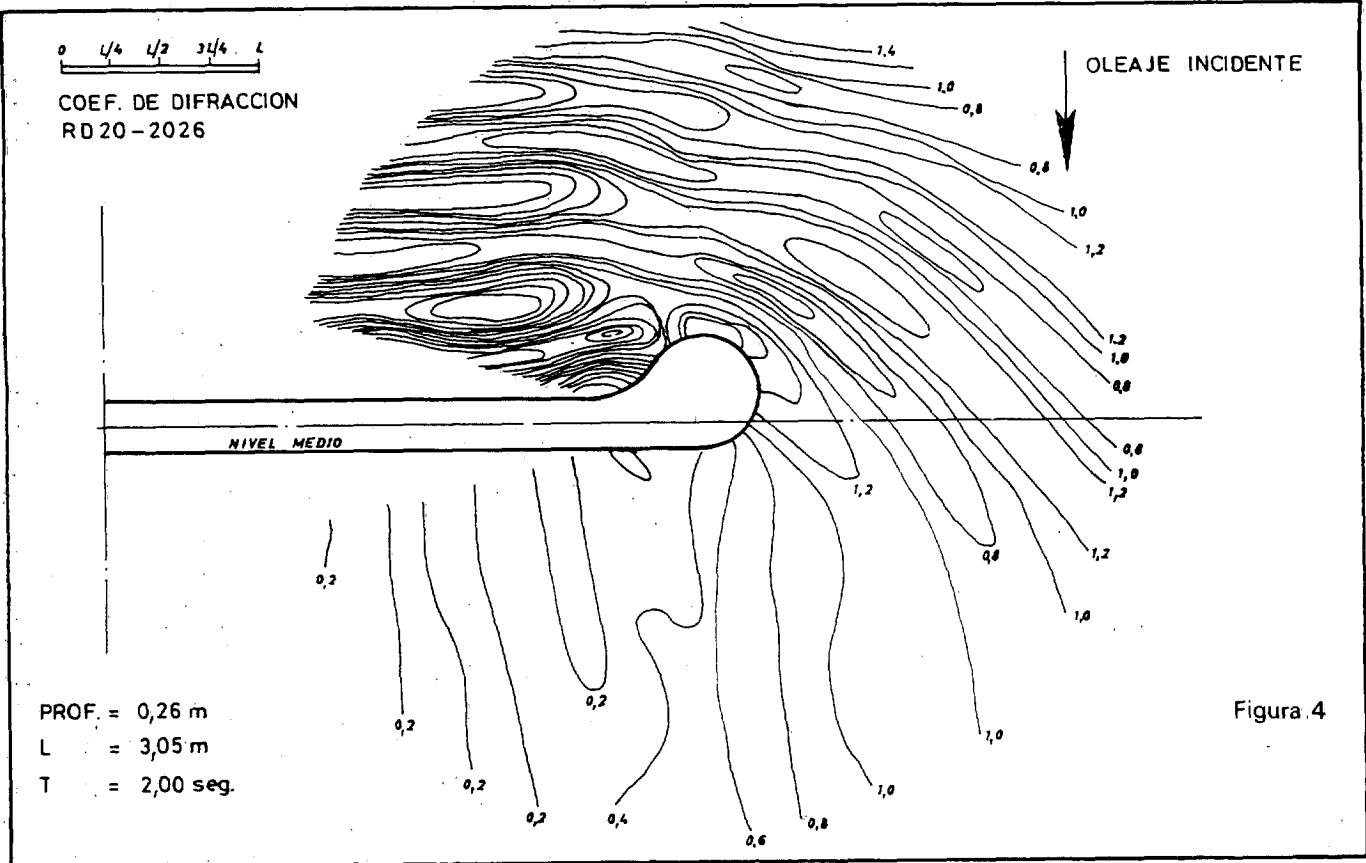


Figura 4

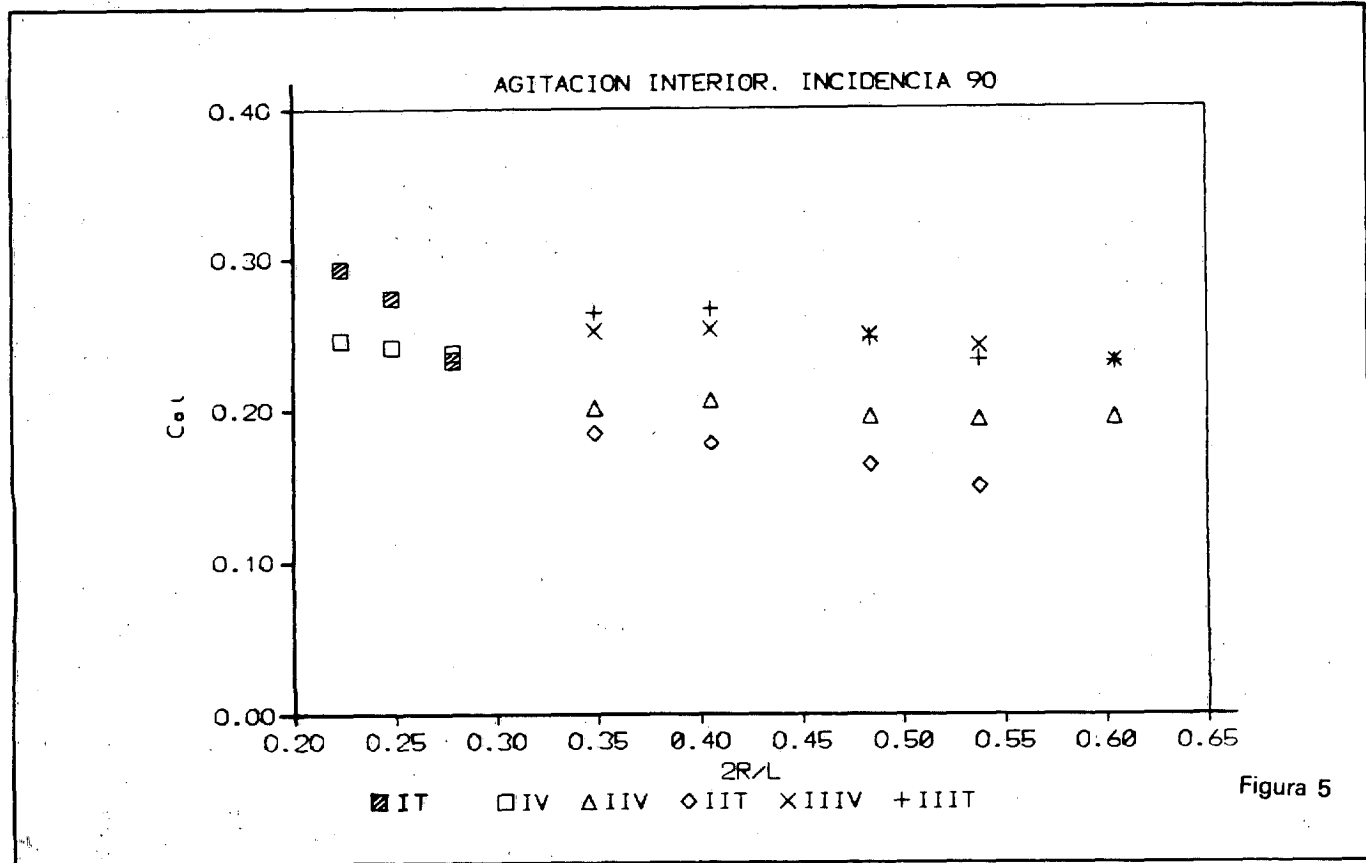


Figura 5

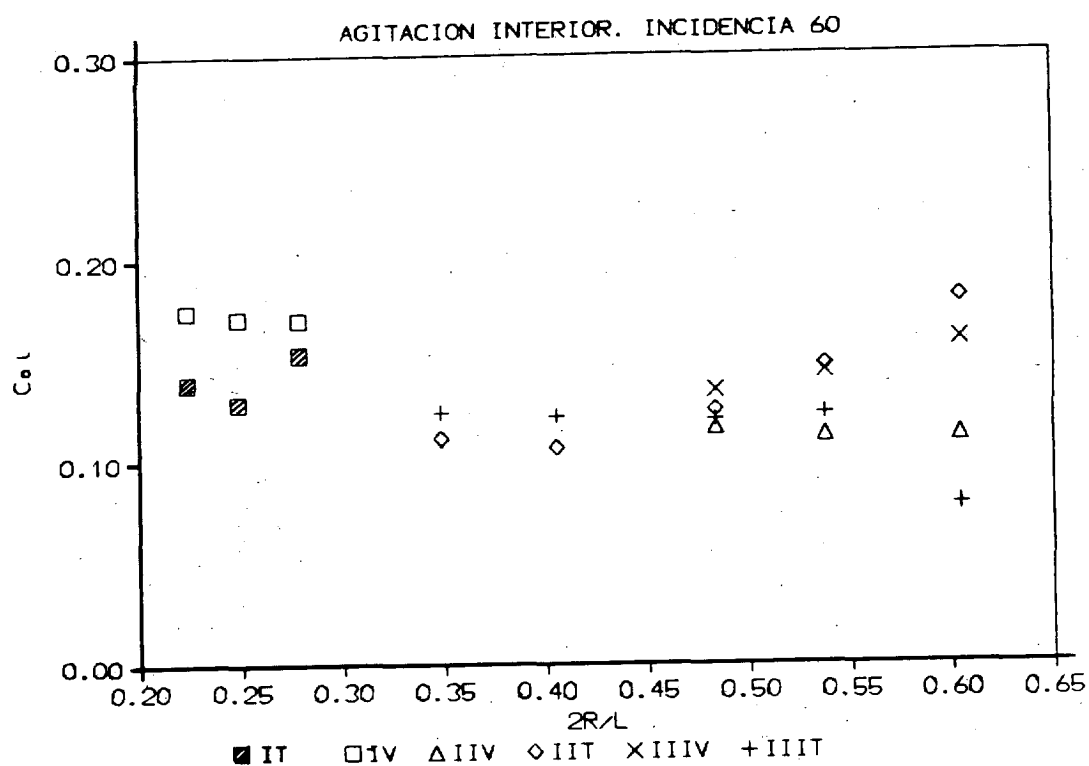


Figura 6

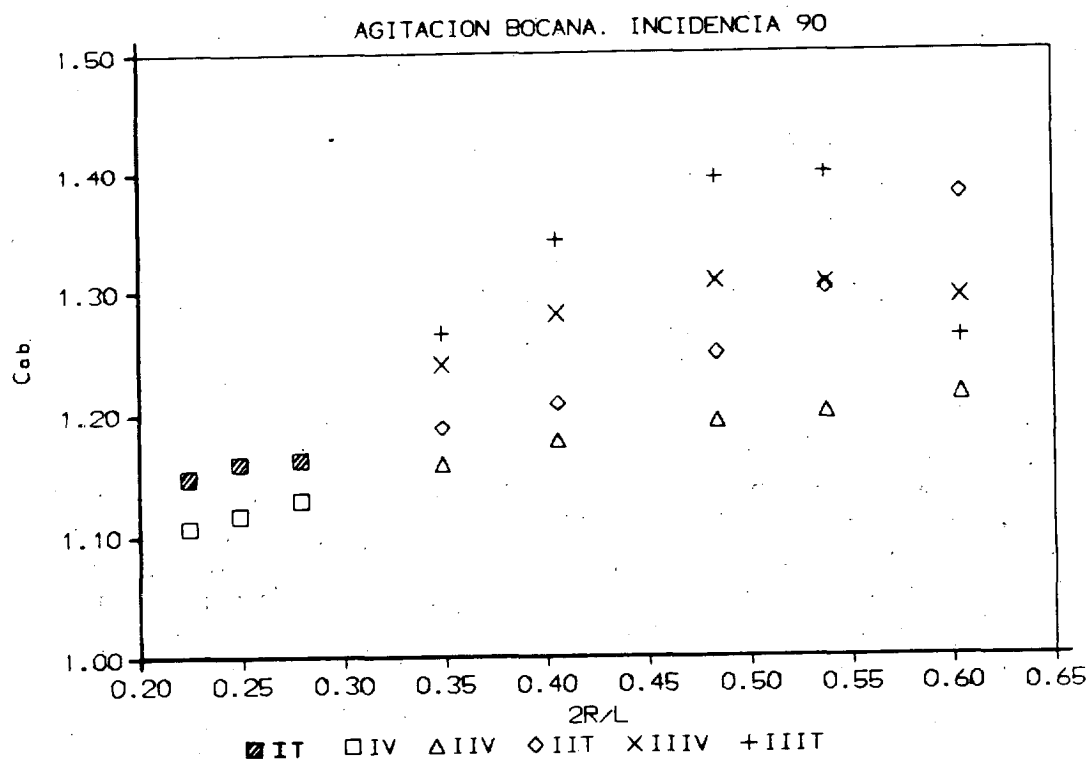


Figura 7

gura 7, se observa una dependencia clara del coeficiente C_{ab} con $2R_c/L$, aumentando la agitación a medida que aumenta el tamaño relativo del morro. Esta dependencia del tamaño relativo se traduce también en mayores agitacione en la bocana para los taludes 2/1 que para los verticales. En el caso de la forma III, la agitación presenta un máximo para valores de $2R_c/L$ próximos a 0,5, disminuyendo rápidamente para valores de $2R_c/L$ mayores, llegando a presentar agitacione inferiores a la forma II en el caso de talud 2/1.

En el caso de incidencia oblicua, figura 8, se mantienen los comportamientos apuntados para las formas I y II e incidencia normal, aunque la variación con $2R_c/L$ es más suave. De nuevo la forma III se destaca por un comportamiento diferente, presentando en este caso un mínimo en valores de $2R_c/L$ cercanos a 0,4, donde la forma III se comporta claramente mejor que la forma II.

Agitación sobre el talud del morro.

Definimos el coeficiente de agitación en el talud, C_{at} , como el máximo coeficiente de difracción sobre una línea media del talud en el área del talud del morro, definida en el apartado 2.2.

La influencia del tamaño relativo del morro se manifiesta de una manera determinante, figuras 9 y 10. Para las formas I y II, e incidencia normal, figura 9, la curva C_{at} presenta un mínimo alrededor de $2R_c/L = 0,3$. Para valores altos de $2R_c/L$ y para la forma II, se alcanzan fuertes amplitudes en el talud del morro, superiores a 2.

Para el caso de la forma III y para incidencia normal, dentro del rango estudiado, el coeficiente C_{at} presenta un máximo en $2R_c/L = 0,48$, obteniéndose valores bastante bajos en ambos extremos del intervalo ensayado, similares a los obtenidos con la forma I.

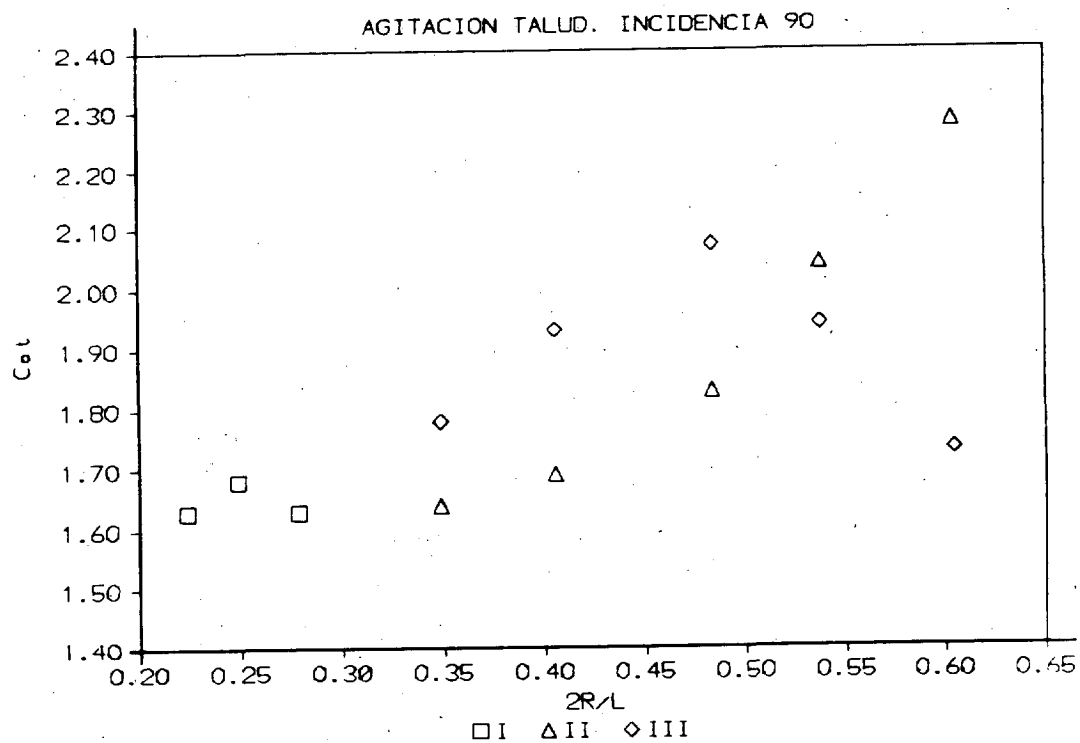
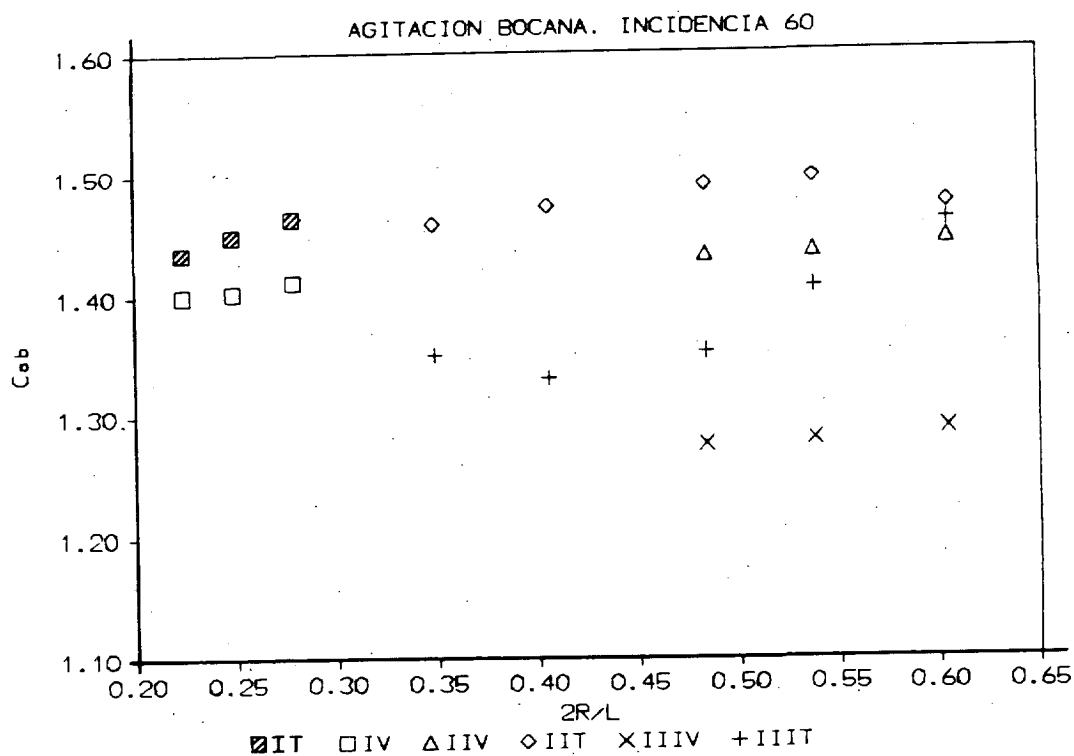
En el caso de incidencia oblicua, figura 10, el coeficiente C_{at} manifiesta una dependencia del tamaño relativo del talud con respecto a la longitud de onda que hace que los resultados de las formas I y II sean claramente diferentes, siendo superiores para la forma II, con taludes relativos menores. En el tramo ensayado, la forma I presenta valores de C_{at} decrecientes con $2R/L$, al igual que ocurre con la forma II en la

zona de menores valores de radio relativo. La forma II presenta en este caso un mínimo en $2R_c/L = 0,48$. La forma III presenta valores crecientes en el rango ensayado, alcanzándose valores superiores a 2 en el límite superior de $2R_c/L$.

Analizando con más detalle la evolución del oleaje a lo largo del talud del morro, en las figuras 11 y 12 se representan las curvas de variación del coeficiente de agitación, $C_a = H/H_i$, (H : altura local, H_i : altura incidente) sobre la línea media del talud sumergido del morro. Como origen de ángulos se toma la recta que pasa por el centro del morro y es perpendicular al frente del oleaje incidente. El sentido creciente es el de las agujas del reloj. Cada una de las curvas corresponde a un valor diferente del tamaño relativo del morro, $2R_c/L$.

Las formas I y II, dada su geometría, tienen comportamientos similares. Fijándose en la forma II, figura 11, los valores menores de $2R_c/L$ producen una variación monótona decreciente de la altura de onda sobre el talud con el ángulo, desde valores cercanos a 2 en el frente de inicio del morro, 0° hasta los 180° . A medida que aumenta el tamaño relativo del morro, el efecto de la difracción hace disminuir el valor de la altura relativa en el origen de ángulos con el consiguiente establecimiento de una zona de agitación mínima dentro de los primeros $45 - 60^\circ$ y de un área de máximos progresivamente más pronunciada y con la cresta desplazada hacia ángulos mayores. Dado que la zona de los $90 - 140^\circ$ se corresponde con la de mínima estabilidad, Vidal et al. (pendiente de publicación), se comprende la recomendación de no construir morros con grandes relaciones $2R_c/L$.

La forma III tiene un comportamiento, en cuanto a la agitación sobre el talud, claramente diferente. En la figura 12 observamos que para los morros mayores, la curva tiene un mínimo en $20 - 60^\circ$ y un máximo en $90 - 120^\circ$, y claramente diferenciados. Al disminuir $2R_c/L$, el mínimo y el máximo tienden a confundirse, llegando a provocar una variación monótona decreciente con el ángulo para valores intermedios de $2R_c/L$. Para los valores menores de $2R_c/L$ estudiados, vuelve a aparecer un mínimo en el origen de ángulos y un máximo en



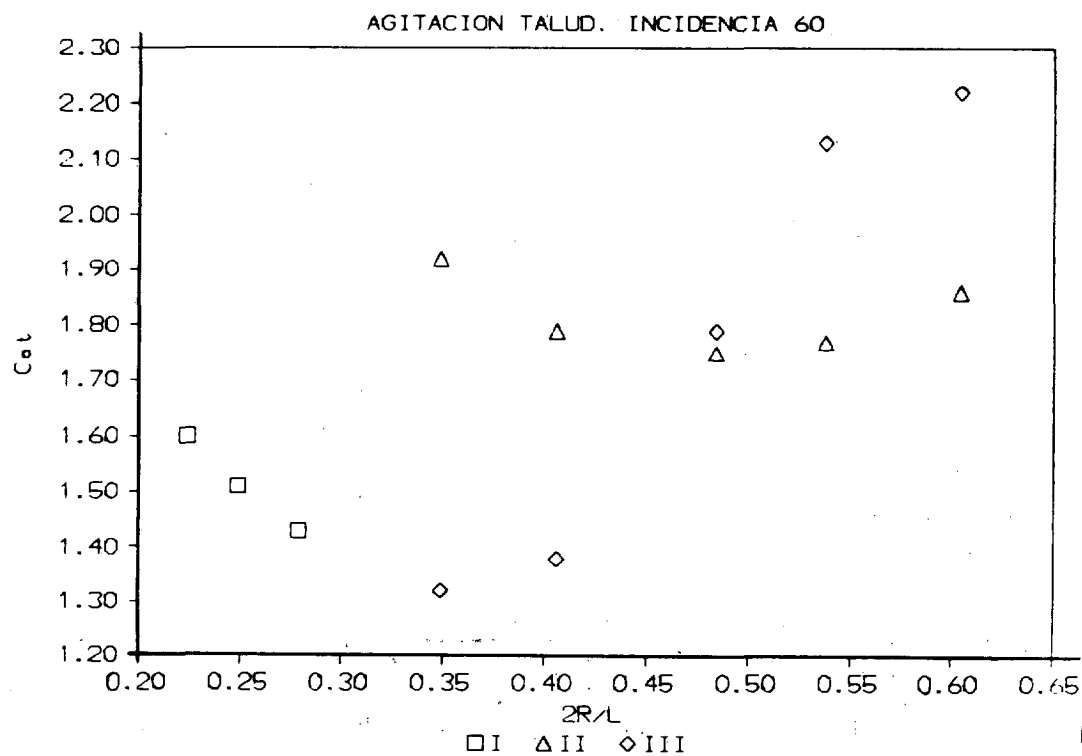


Figura 10

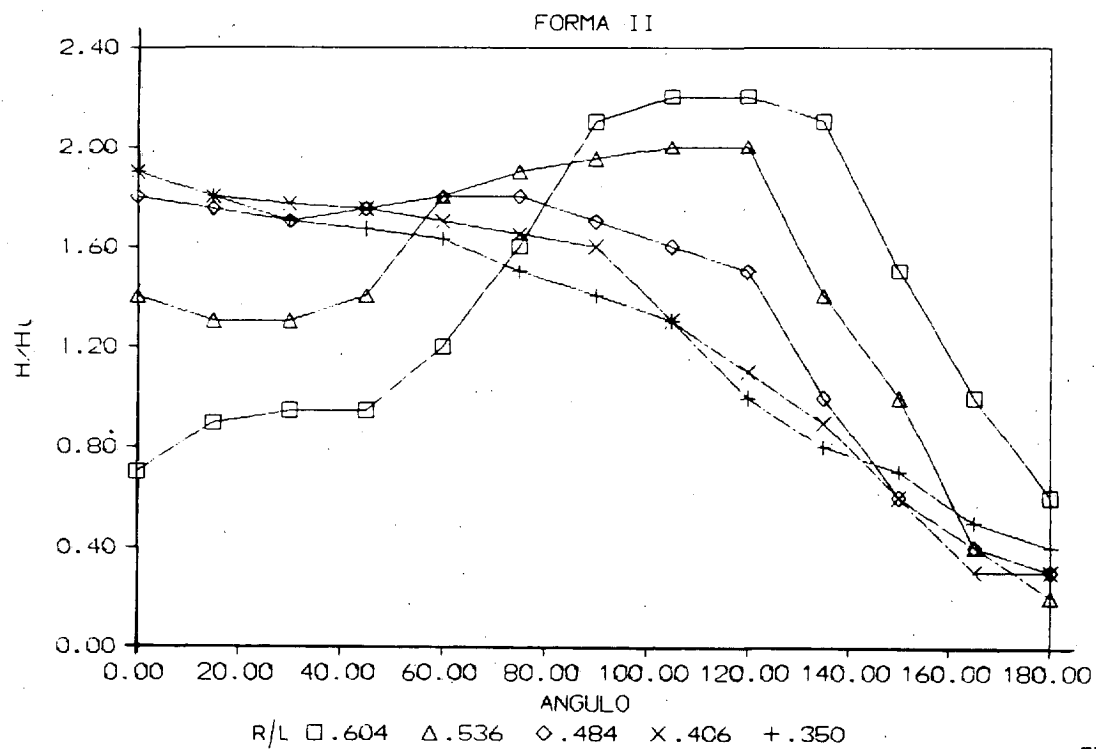


Figura 11

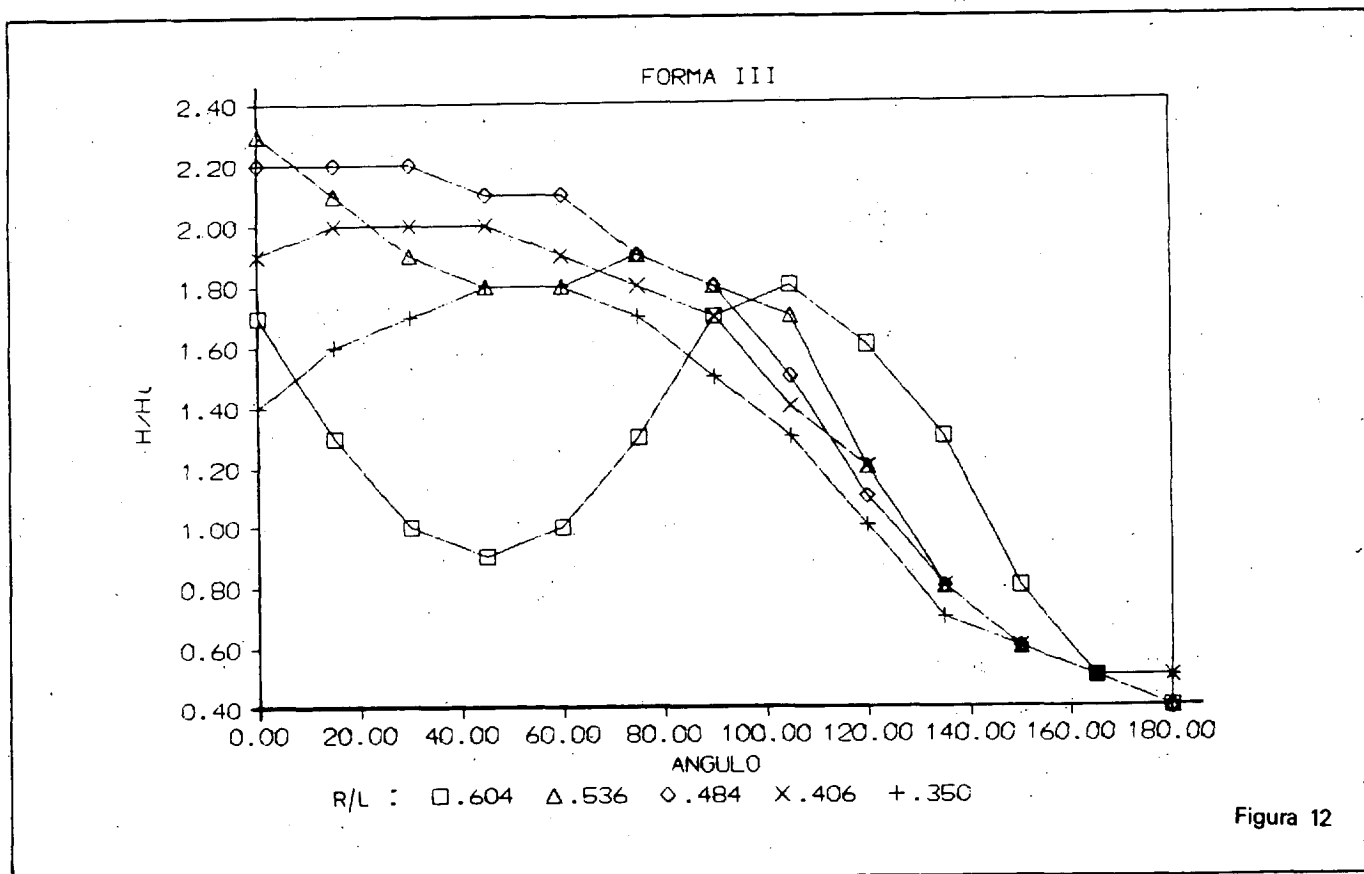


Figura 12

ángulos intermedios, 40 - 60°. Aunque no se han ensayado valores menores de $2R_c/L$, en el límite, y cuando $2R_c/L$ es muy pequeño, el comportamiento deberá ser similar al obtenido para los menores valores de $2R_c/L$ en las formas I y II, es decir, una curva monótona decreciente desde el origen de ángulos. En las secciones de mínima estabilidad, la forma II provoca menores amplitudes de onda sobre el talud de grandes morros que las formas I y II.

4.3. Efecto de la permeabilidad y rugosidad del manto

Las ejecuciones del modelo numérico se han realizado con el supuesto de talud liso e impermeable, con el objeto de resaltar en lo posible las diferencias entre los comportamientos para las diferentes formas de los morros.

En el caso de tratarse de un talud rugoso y permeable, se puede aplicar la condición de contorno parcialmente absorbente. Los diques en talud presentan coeficientes de reflexión del orden del 30 por 100 de la altura de ola inci-

dente, lo que se corresponde a un coeficiente de absorción definido en (3.14b) de $\alpha = 0,5$. Para este caso y por ejemplo para la forma I, talud vertical y $T = 1,8$ seg., si comparamos los resultados para el coeficiente de agitación con los obtenidos con $\alpha = 0$, se observa que los máximos en el área de reflexión, pasan de valores alrededor de 2 para $\alpha = 0$ a valores alrededor de 1,2 para $\alpha = 0,5$. Como el objeto de este trabajo es determinar la influencia de la forma del morro en la agitación en sus proximidades, la condición de absorción nula resalta las diferencias entre los diferentes casos, lo que facilita el análisis de los resultados.

5. CONCLUSIONES

A la vista de lo expuesto en los apartados anteriores, se puede concluir:

Agitación interior

— La agitación interior aumenta al disminuir el tamaño relativo del morro, $2R_c/L$, para una

misma configuración del morro. Este aumento es pequeño y es compensado por la disminución de volumen del morro y la mejora de las condiciones en la bocana y en el talud del morro.

— El efecto del talud es poco importante en lo que respecta a la agitación interior, siendo muy similares los resultados obtenidos con talud vertical o con talud 2/1.

— La forma II ofrece más abrigo interior, para el mismo $2R_c/L$, que la forma III, en el caso de incidencia normal. La forma I se comporta de forma similar a la II.

Agitación en la bocana

— La agitación en la bocana aumenta al aumentar el tamaño relativo del morro, $2R_c/L$, para una misma configuración del morro.

— La agitación en la bocana es superior para los diques en talud que para los verticales, para una misma relación $2R_c/L$ al nivel medio.

— Las formas I y II dan una agitación creciente con el radio relativo del morro. La forma III presenta un máximo para incidencia normal cercano a $2R_c/L = 1,4$. En el caso de incidencia oblicua, el mejor comportamiento se obtiene con la forma III. De lo anterior se deduce que la forma más económica y de mejor comportamiento en cuanto a la agitación en la bocana es la forma I con valores bajos de $2R_c/L$.

Agitación sobre el talud del morro

— La agitación máxima sobre el talud del morro depende fuertemente de $2R_c/L$. Las formas I y II, similares en el caso de incidencia normal, presentan un mínimo alrededor de $2R_c/L = 0,35$. En el caso de incidencia oblicua no existe similitud entre las formas I y II, presentando esta última un mínimo en $2R_c/L = 0,48$.

— En cuanto a la situación del máximo de agitación a lo largo de la curva del morro, el mejor comportamiento con vistas a la estabilidad de las piezas del talud corresponde a las formas I y II con valores de $2R_c/L$ pequeños, los cuales alejan el máximo de agitación de la zona de mínima estabilidad.

— La forma III presenta un máximo de C_t en $2R_c/L = 0,48$, comportándose claramente mejor que la II en los valores altos del radio relativo, para incidencia normal. En el caso de incidencia oblicua, la forma III da valores del C_{at} monótonamente crecientes con el radio relativo. En este último caso, los valores del C_{at} obtenidos son claramente superiores a los de la forma II en el extremo superior del intervalo e inferiores a los de la forma II en el extremo inferior.

Como del trabajo realizado se ha obtenido que las diferencias entre las diferentes formas no son muy importantes, se concluye que en el caso de agitación, y para diques reales de materiales sueltos, la importancia de la forma en planta de la agitación queda en un segundo término frente a la influencia del coeficiente de reflexión y del tamaño relativo del dique, $2R_c/L$.

A la vista de lo expuesto, y como conclusión final, el aumento del tamaño del morro no mejora de una manera importante las condiciones de agitación interior, siendo su acción claramente desfavorable en cuanto a su efecto sobre la agitación en la bocana y en el talud del morro. Esto lleva a recomendar la ejecución de morros simétricos (forma I) y de dimensiones lo menores posible compatibles con su estabilidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por la Dirección General de Puertos y Costas, Programa de Clima Marítima, dentro del Proyecto de Investigación «Análisis experimental del comportamiento hidrodinámico de las secciones del morro de un dique. Estudio de agitación y estabilidad.» ■

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Argershou, H., Lundgren, H., y Sorensen, T., 1982. «Planning and design of ports and marine terminals». Ed. John Wiley and Sons.
2. Benasay, E. et al., 1984. «Study on the transition from a rubble mound to a vertical wall breakwater». Int. Symp. on Maritime Structures in the Mediterranean Sea, Nat. Tech. Univ. of Athens.

3. Behrendt, L., 1985. «A finite element model for wave diffraction including boundary absorption and bottom friction». Institute of Hydrodynamics and Hydraulics Engineering. Tech. Univ. of Denmark.
4. Bruun, P., 1973. «Port engineering». Gulf Publishing Co.
5. Iribarren, R., 1964. «Obras marítimas». Ed. Dossat, S. A., Madrid, España.
6. John, F., 1950. «On the motion of floating bodies, II». Comm. Pure and Applied Math., Vol. 3, pp. 45-101.
7. Kato, J. & Uekita, Y., 1971. «Diffraction by block mound or submerged breakwater». Proc. of the 1st. Int. Conf. on Port and Ocean Eng. Under Artic Conditions. The Tech. Univ. of Norway.
8. Lamb, H., 1945. «Hydrodynamics». 6th. Ed., Dover, New York.
9. MacCamy, R. C. & Fuchs, R. A., 1954. «Wave forces on piles: a diffraction theory». U.S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 69.
10. Sarpkaya, T. & Isaacson, M., 1981. «Mechanics of wave forces on offshore structures». Van Nostrand Reinhold Co. New York.
11. Svendsen, I. A. & Jonsson, I. G., 1980. «Hydrodynamics of coastal regions». Technical University of Denmark.
12. Vidal, C., Losada, M. A. «Estabilidad del morro de los diques en talud. Influencia de su geometría». (Pendiente de publicación).

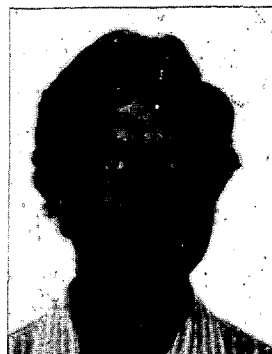
José María Desiré Fernández

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. Ha desarrollado una amplia labor investigadora en el área de Ingeniería Oceanográfica y Portuaria de la Universidad de Cantabria, realizando numerosos trabajos, como: estudio de diques, ordenación de playas, estudios oceanográficos, etc.

Actualmente es Director de la Sociedad de Transferencia de Tecnología de la Universidad de Cantabria.

Ha publicado artículos especializados, tanto en España como en revistas extranjeras: Revista de Obras Públicas, American Society of Civil Engineers, Journal of Coastal Research, Coastal Engineering, etc.

César Vidal Pascual

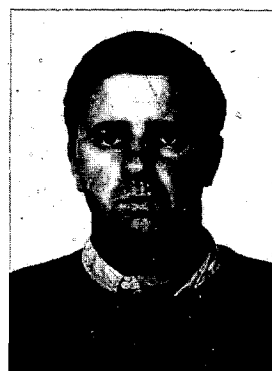


Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. Profesor Titular de dicha Universidad, adscrito al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Sus trabajos se han centrado en el área de la Ingeniería Oceanográfica y Costera y, más concretamente, en la puesta a punto y funcionamiento de la generación de

ondas en canal y tanque de oleaje, así como en la elaboración y estudio de modelos reducidos de playas y desembocaduras de ríos.

Ha publicado numerosos artículos, tanto en España como en revistas extranjeras: Revista de Obras Públicas, American Society of Civil Engineers, etc.

Iñigo J. Losada Rodríguez



Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria. Como Becario de Formación del Personal Investigador (M.E.C.), adscrito al Departamento de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de Cantabria, ha desarrollado varios trabajos de investigación dentro del campo de la Ingeniería Oceanográfica y Costera: Estudio para la instalación de arrecifes artifi-

ciales en el Mar Cantábrico, análisis numérico y experimental de la morfodinámica de los sistemas de playa (CICYT) estudio de desembocaduras de ríos, etc.

