

ESTABILIDAD DE DIQUES REBASABLES

C. Vidal ⁽¹⁾, M.A. Losada ⁽¹⁾, R. Medina ⁽¹⁾, E.P.D. Mansard ⁽²⁾

Mediante experimentación en tanque de oleaje se ha estudiado la estabilidad de diques rebasables de escollera. Se ha considerado como variables de ensayo la altura de ola y el francobordo. Para ello, se ha construido varios modelos de diques rebasables exentos en los que se ha separado cada uno de los sectores sometidos a distintas condiciones de flujo: Talud Exterior, Coronación, Talud Interior, sector Exterior del Morro y sector Interior del Morro. Como sección de control se ha separado asimismo un sector Talud Completo del tronco del dique que incluye el Talud Exterior, Coronación y Talud Interior.

Los resultados de los ensayos se han utilizado para determinar las curvas de estabilidad de cada sector del dique, en función del francobordo y para cada nivel de daño. Las curvas de estabilidad de los sectores de la Coronación y del Talud Interior muestran un mínimo de estabilidad para francobordos inferiores al de no rebase. El sector del Talud Completo del tronco del dique tiene un comportamiento que es el reflejo de la respuesta de cada uno de los sectores implicados. Como consecuencia, en el sector del Talud Completo pueden aparecer mínimos de estabilidad para francobordos positivos, dependiendo de la contribución de la Coronación y del Talud Interior a la estabilidad del Talud Completo.

La estabilidad del sector Interior del Morro es muy dependiente del francobordo. Para rompeolas sumergidos, este sector es mas estable que la Coronación y el Talud Exterior del dique. Por el contrario, para diques emergidos, el sector Inte-

rior del Morro es el menos estable del rompeolas y, también, el mas frágil.

Introducción

Los diques semisumergidos y sumergidos se diseñan para permitir la transmisión de una parte importante de la energía del oleaje. El mecanismo de transmisión mas importante es el rebase sobre la coronación, aunque la transmisión a través del dique puede ser significativa.

Debido al rebase, el flujo sobre el talud de barlovento del dique (que denominaremos en lo sucesivo Talud Exterior) disminuye en intensidad a medida que disminuye el francobordo (porción del dique emergida con el mar en reposo). Debido a ello, el peso de las piezas del manto exterior puede ser inferior al necesario en el caso de que el dique impida el rebase. Las formulaciones existentes para el cálculo del peso de las piezas del manto, tienen en cuenta este aumento de estabilidad que se produce en el talud exterior con la disminución del francobordo. Otros sectores del tronco del dique, como son la Coronación y el talud de sotavento (en los sucesivos Talud Interior), ven aumentar la acción del flujo a medida que disminuye el francobordo, con la consiguiente disminución de la estabilidad. La combinación del aumento de estabilidad del Talud Exterior con la disminución de la misma en la Coronación y Talud Interior, pueden llevar a mínimos de estabilidad para francobordos positivos intermedios, como sugiere Ahrens et al. (1989). Losada et al. (1992) utilizaron datos experimentales de velocidad y valores analíticos obtenidos de Kobayashi et al. (1990), para demostrar que el mínimo de estabilidad en las piezas de la Coronación se debería obtener para la Coronación en el nivel medio en reposo. Estudios experimentales de US. Army (1965), Raichlen (1972), Magoon et al. (1975) y

⁽¹⁾ Grupo de Ingeniería Oceanográfica y Costera. Dep. de Ciencias y Técnicas del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Cantabria. Santander.

⁽²⁾ Hydraulics Laboratory, National Research Council of Canada. Ottawa.

Walker et al. (1976), sugieren que el Talud Interior de los diques rebasables puede ser mas susceptible al daño que el Talud Exterior o la Coronación en determinadas condiciones de oleaje.

En lo concerniente a la estabilidad de los morros de diques semisumergidos, Grace (1989) presentó los resultados de ensayos en modelo de un dique con el francobordo a 2,44 m sobre el nivel medio en reposo. El número de estabilidad de las piezas del morro para daño nulo obtenido en los ensayos fue un 77 % inferior al de las piezas del Talud Exterior, lo que significa que el peso de las piezas del morro debería ser al menos el doble de las del Talud Exterior. Este resultado se aproxima a los obtenidos en el caso de diques no rebasables, Jensen (1984), Vidal et al. (1991). Sin embargo, la información existente sobre el efecto del francobordo en la estabilidad de los morros es prácticamente inexistente, especialmente en el caso de diques sumergidos.

Este artículo analiza experimentalmente la estabilidad de los distintos sectores del dique y tratará de demostrar que cada uno de ellos tiene un comportamiento diferente, que no puede ser deducido del comportamiento de la sección completa del tronco del dique, la única analizada en los ensayos bidimensionales convencionales. Primero, se establece unos criterios generales «ingenieriles» para la definición del daño en los diques. Segundo, se describe la experimentación realizada y los resultados obtenidos. Tercero, se analiza los resultados de estabilidad por sectores del dique y se realiza un estudio comparativo de la estabilidad de cada uno de ellos. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas del análisis.

Criterios de daño

Como indicaremos mas adelante, se utilizará el área de daño, A_d y el n.º de unidades desplazadas del sector, N_e para la evaluación del daño en los diferentes sectores. Sin embargo, los valores de estas variables no dan ninguna información «a priori» sobre el estado de daño «global» de la estructura, porque este último depende, además de la geometría del sector considerado. Para relacionar el estado de daño con valores específicos de las variables anteriores se requiere la definición de unos criterios de daño de carácter general.

Losada et al. (1986) definieron tres grados diferentes de daño en el manto principal, (considerado formado por dos capas de piezas), reconocibles visualmente: Iniciación de Avería (IA), Avería de Iribarren (AI) y Destrucción (D). Vidal et al. (1991), propuso un nivel de daño adicional, Inicio de Destrucción. Las definiciones individuales de estos niveles de daño son las siguientes:

■ **Iniciación de Avería:** Este nivel de daño se alcanza cuando un n.º determinado de piezas de la capa exterior del manto principal se desplaza de su posición original una distancia igual o mayor que un diámetro y la citada capa comienza a mostrar claramente huecos de un tamaño superior al correspondiente al tamaño medio del poro.

■ **Avería de Iribarren:** Se dice que la estructura alcanza esta nivel de daño cuando el área dañada

de la capa exterior del manto principal es tal que el flujo actúa directamente sobre las piezas de la capa interior del manto principal, cuyas piezas pueden, por lo tanto, ser extraídas.

■ **Inicio de Destrucción:** Este nivel de daño se alcanza cuando un número determinado de piezas de la capa interior del manto principal han sido extraídas y esta capa interior presenta Inicio de Avería.

■ **Destrucción:** Cuando las piezas del manto secundario comienzan a ser extraídas, significa que la sección de equilibrio con el oleaje sólo se alcanzará con fuertes deformaciones de la sección, en general incompatibles con el nivel de servicio de la estructura, por ello, cuando aquello ocurre se dice que el dique ha alcanzado la destrucción.

En lo sucesivo, emplearemos estos criterios de daño. Las relaciones entre el daño medido (área dañada o número de piezas desplazadas) y estas definiciones de daño se han determinado experimentalmente y se presentan en la Tabla 3, para cada uno de los sectores ensayados.

Experimentación

La experimentación física se ha realizado en el Coastal Zone Engineering Laboratory del Institute for Mechanical Engineering, perteneciente al National Research Council del Canada, sito en Ottawa, Canadá.

El área neta utilizada en los tanques de oleaje fue de 34 x 14 m.². La Figura 1 muestra una planta general de la disposición experimental. Los modelos se sitúan con el eje longitudinal paralelo a la pala generadora de oleaje, a 20,6 m. de la misma. En uno de los laterales del área de ensayo se conforma un canal de 1,5 m. de anchura, para la medida de las características del oleaje en el dominio del tiempo. En los laterales y frente a los morros del modelo se disponen varios módulos verticales de placas porosas para la disipación del oleaje radiado por los morros. En el fondo del tanque, en el lado opuesto a la pala generadora se construye una playa de grava, con pendiente 1/15, para la disipación del oleaje. Entre el modelo y la playa disipadora se deja una zona libre de 5 m de longitud, para la medida de las características del oleaje transmitido y difractado.

La oscilación de la superficie libre se midió en 11 puntos diferentes, utilizando sensores de nivel capacitivos. Un sensor se situó en las proximidades de la pala generadora, para la medida del oleaje generado en sus proximidades. Para la separación, en el dominio de la frecuencia, de los trenes incidente y reflejado, se dispusieron tres sensores, en el eje transversal del modelo por el lado de barlovento, con una separación entre ellos según los criterios recomendados por Mansard and Funke (1987). En el canal lateral, a la misma distancia de la pala que los tres sensores de reflexión, se situó otro juego de tres sensores, para la medida del oleaje incidente. Por último, para la medida del oleaje transmitido y difractado, se utilizaron cuatro sensores, situados en el eje transversal del modelo, entre el mismo y la playa de disipación.

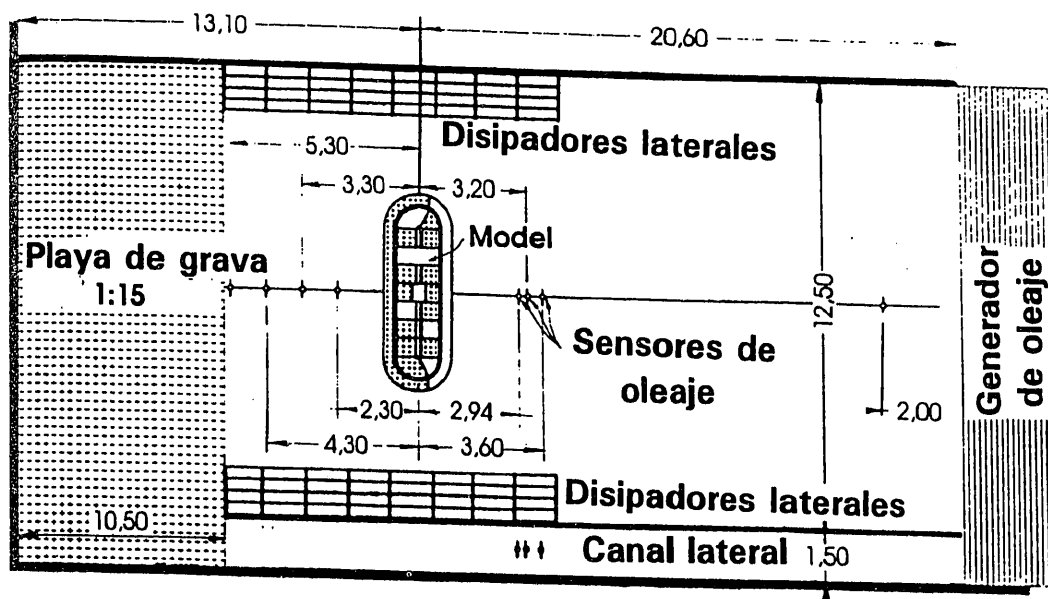


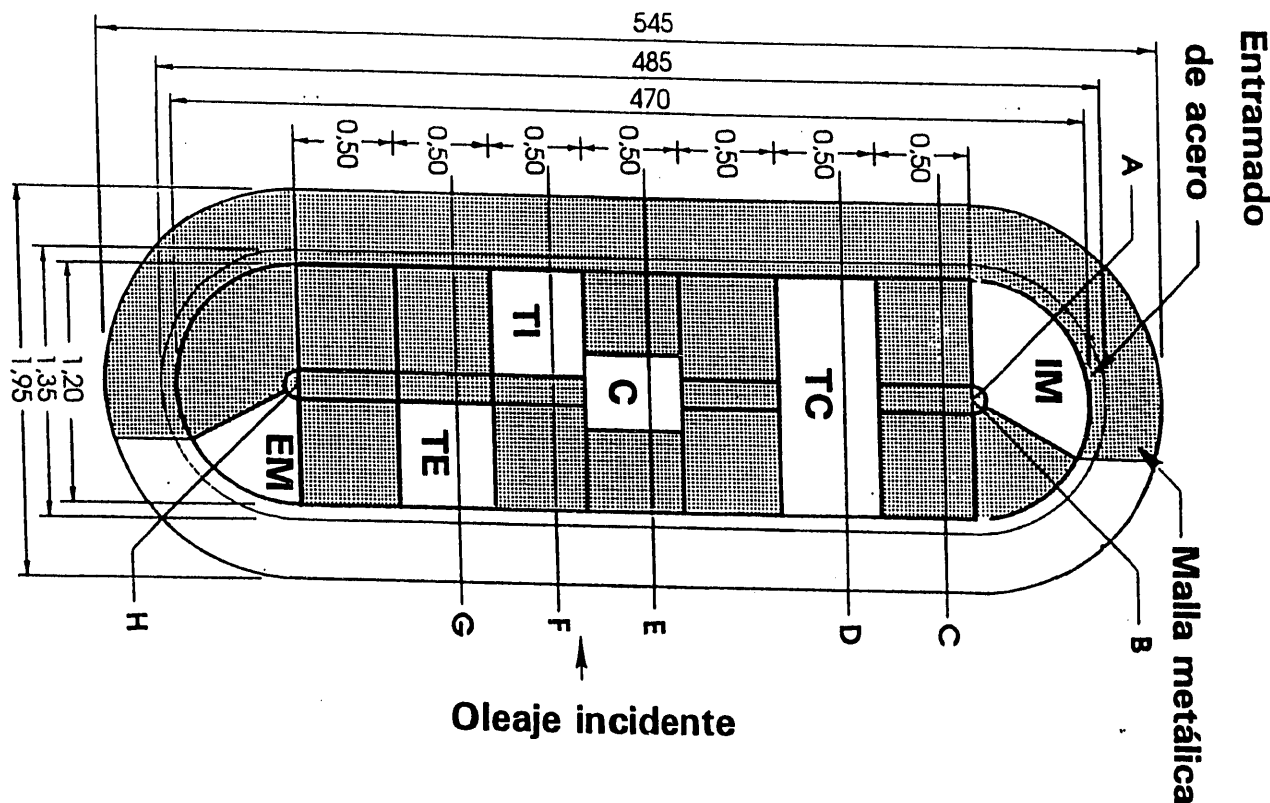
Figura 1. Planta general de la disposición experimental en el tanque de ensayos.

La Figura 2 muestra una planta de los modelos. Para asegurar la geometría de los diferentes sectores del dique, se construyó un entramado de acero que cubría los 35 cm. superiores del modelo. Mediante este entramado, se definieron seis sectores, cuatro en el tronco del dique y dos en los morros. Los sectores del tronco del dique, de 50 cm. de anchura cada uno fueron: Talud Exterior (TE), Coronación (C), Talud Interior (TI) y Talud Completo (TC). Los sectores de los morros fueron: Exterior Morro (EM), cubriendo los 60° ex-

teriores de uno de los morros e Interior Morro (IM), cubriendo los 120° restantes del otro morro. El área restante del dique, no incluida en estos sectores, se cubrió con una tela metálica de malla cuadrada, de 1 cm. de lado. De esta manera se evitó que las áreas cubiertas sufrieran movimiento de las piezas sin modificar las características del flujo sobre y a través de la estructura.

La sección tipo del dique, ver Figura 3 para la definición de las variables, estaba compuesta por un núcleo permeable, armado con dos capas de

Figura 2. Planta de los modelos físicos del dique.



DIQUE REBASABLE

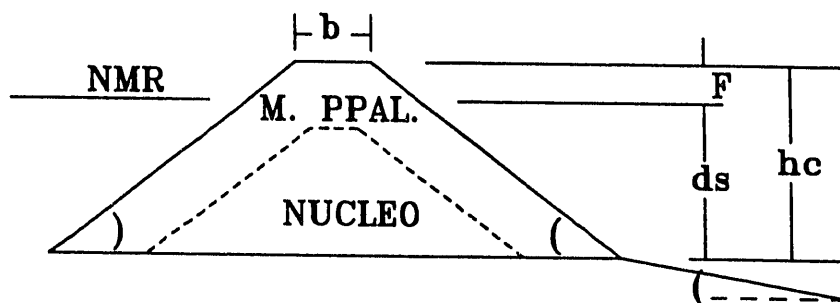


Figura 3. Sección tipo del dique.

escollera, seleccionadas por peso. Algunas de las características mas importantes de las piezas del manto principal y del núcleo se presentan en la Tabla 1.

La selección cuidadosa del peso del manto principal permite un fácil seguimiento de las piezas y la definición de las mismas por su diámetro nominal. Para un fácil seguimiento de las piezas se

Tabla 1. Características de los mantos del modelo

Param.	Manto P.	Núcleo
D_{n15} cm	2,37	1,64
D_{n50} cm	2,49	1,90
D_{n85} cm	2,64	2,24
ρ , g/cm ³	2,65	2,65
P_s	0,45	0,44

Tabla 2. Parámetros objetivo de los ensayos en modelo

N.º Ensayo	d_s cm	h_c cm	T_p s.	H_{mo} cm.
1,4,5,2,3,	40	40	1,4	5,8,8,10,13
13	60	60	1,4	15
9,6,7,8	45	40	1,4	8,10,13,15
14,15	65	60	1,4	15,18
12,10,11	38	40	1,4	8,10,12
16,17	58	60	1,4	5,18
18,19,20,21,22,23	56	60	1,4	5,8,10,13,16,19
24,25,26,27,28,29	54	60	1,4	6,8,10,12,14,16
30,31,32,33	58	60	1,8	6,9,12,15
34,35	54	60	1,8	8,11

utilizó un código de colores. Todas las pendientes de los taludes fueron 1/1,5 y la anchura de la coronación fue de 15 cm., equivalente a, aproximadamente 6 diámetros nominales de las piezas del manto principal.

Para la medida del daño se tomaron, antes y después de cada ensayo, perfiles, película de video y fotografías en color, estas últimas siempre desde los mismos puntos y con los mismos parámetros ópticos, para poderlas superponer. Durante el período de generación de oleaje de cada ensayo (1 hora), se tomó película de video de cada uno de los sectores, a razón de una imagen cada dos segundos, para seguir la evolución del daño. El perfilado de las secciones transversales del tronco del dique se realizó mediante un perfilador electro-mecánico. Se perfiló sobre nueve perfiles de cada uno de los sectores del tronco del dique, con una separación entre perfiles de 5 cm. y con una frecuencia de muestreo de 20 puntos por segundo. El daño en los sectores de los morros se determinó mediante el análisis de los datos fotográficos. Los sectores dañados se reconstruyeron completamente después de cada ensayo.

Las series temporales de oleaje, de una hora de duración, se sintetizaron utilizando el método de las Fases Aleatorias. Las series sintetizadas tenían una forma espectral JONSWAP, con períodos de pico de 1,4 s y 1,8 s. El factor de apuntamiento elegido fue $\gamma=3,3$ y la altura de ola del momento de orden cero del espectro, H_{m0} , fue variable en cada ensayo. El algoritmo del NRC utilizado para la síntesis se describe en Funke and Mansard (1984). Se realizaron un total de 35 ensayos. Los parámetros objetivo mas importantes de estos ensayos se muestran en la Tabla 2.

Proceso de los datos medidos

Los datos obtenidos mediante los sensores de nivel fueron sometidos a análisis espectral, de agrupamiento, de paso ascendente por cero y distribución de alturas de ola. Los datos adquiridos por los tres sensores situados frente al modelo se sometieron a análisis de reflexión.

Los datos obtenidos mediante el perfilado de las secciones del tronco, antes y después de cada ensayo, se procesan para ajustar el origen del perfil al quiebro de una barra metálica situada en el fondo del tanque. A continuación se interpolan los perfiles (tomados originalmente con una frecuencia de muestreo de 20 Hz.), para almacenar los perfiles por puntos equidistantes 1 mm. entre si. Por último se utilizan los perfiles antes y después del ensayo para determinar el área de erosión. Promediando las áreas de erosión de los perfiles correspondientes a cada sector del dique se obtiene el área de erosión media para cada sector, A_e . A partir de este parámetro, se define el parámetro adimensional de daño para cada sector, S_p , mediante la expresión:

$$S_p = \frac{A_e}{D_{n50}^2} \quad (1)$$

Donde D_{n50} es el tamaño nominal de las piezas, que es el lado del cubo equivalente de las piezas del manto principal que tienen un peso correspondiente al cuantil 50 % en la función de distribución de pesos.

Mediante la superposición de transparencias de las fotografías de cada uno de los sectores, tomadas antes y después de cada ensayo, se ha determinado el número de piezas de cada manto desplazadas por la acción del oleaje, N_{eL} , donde la L hace referencia a la anchura del sector (50 cm. para los sectores del tronco y variable según se indicará mas adelante, en los sectores de los morros). Conocido el n .º de piezas desplazadas en el sector de anchura L y la porosidad del manto principal, P_a , se define el parámetro de daño visual equivalente, S_v :

$$S_v = \frac{N_{eL} D_{n50}}{(1 - P_a)L} \quad (2)$$

En el caso de los sectores de los morros, el único método utilizado para evaluar el daño fue el del análisis fotográfico. Debido a la forma troncocónica de los morros, la traducción del número de unidades desplazadas a un parámetro de daño es mas complicada que en los sectores del tronco del dique y la metodología seguida se describe a continuación:

De la inspección visual del daño en los sectores de los morros, se llegó a la conclusión que el área dañada se encontraba limitada entre los niveles $H_s/2$ y H_s por encima y por debajo del nivel medio en reposo, respectivamente, siendo H_s la altura de ola significativa incidente del ensayo que ha producido el daño. Cuando el francobordo es menor que $H_s/2$, el límite superior de la zona de daño corresponde al nivel de la coronación. Si r_1 y r_2 son los radios del morro correspondientes a las cotas superior e inferior de la zona averiada, (ver Figura 4), el radio del morro en el nivel intermedio de la avería, R , será:

$$R = \frac{r_1 + r_2}{2} \quad (3)$$

Si α es el ángulo que forma el talud del morro con la horizontal, a partir de la Figura 4 y de la definición (3), obtenemos las siguientes expresiones para el radio del morro en el nivel medio de la zona de avería:

$$R = \begin{cases} \frac{b}{2} + \frac{\cot \alpha (H_s + F)}{2}; & \text{para } F \leq \frac{H_s}{2} \\ \frac{b}{2} + \cot \alpha \left(\frac{H_s}{4} + F \right); & \text{para } F > \frac{H_s}{2} \end{cases} \quad (5)$$

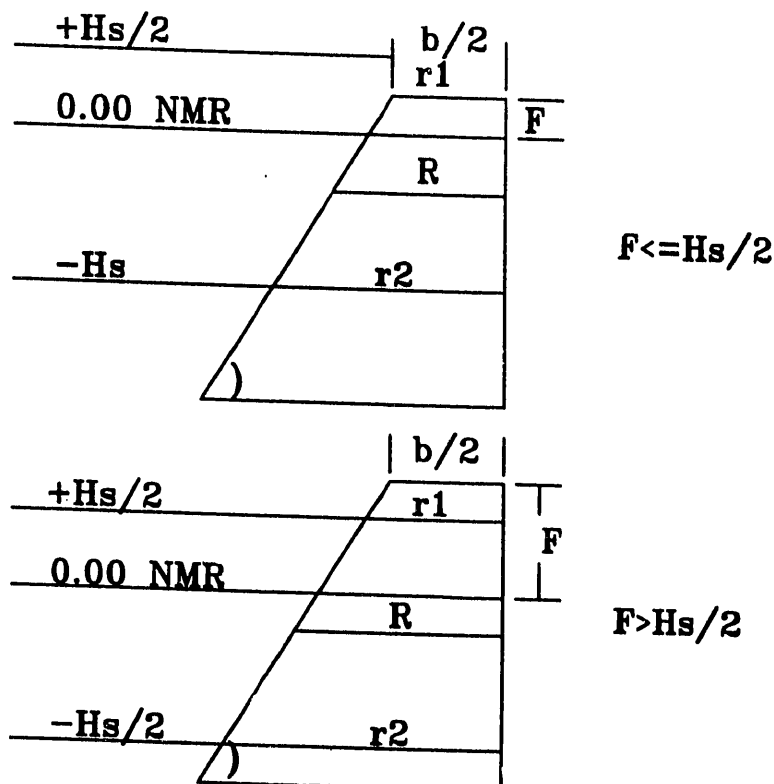
La longitud del arco del morro, $A_{L\theta}$, correspondiente al nivel medio del área dañada de un sec-

tor de θ radianes es $R\theta$. Si N_{θ} es el n .º de piezas desplazadas en el sector de ángulo θ , el parámetro de daño visual equivalente para los sectores del morro, S_{vh} será, al igual que (2):

$$S_{vh} = \frac{N_{\theta} D_{n50}}{(1 - P_a)A_{L\theta}} \quad (6)$$

Utilizando las expresiones (2) y (6) se ha obtenido los parámetros visuales de daño equivalentes para los sectores del tronco y de los morros, respectivamente. Los datos del parámetro de daño, obtenidos mediante el perfilado han resultado ser mas precisos que los datos obtenidos mediante el análisis fotográfico cuando el n .º de piezas desplazadas en un sector es elevado, superior a 80. Cuando el daño es bajo, menos de 30 piezas desplazadas por sector, el análisis fotográfico ha resultado mas preciso. Para las situaciones intermedias se realiza una interpolación compensada de manera que, para los sectores del tronco, el parámetro de daño se define de la siguiente manera:

Figura 4. Esquema para la definición del daño en los sectores de los morros.



$$S = \begin{cases} S_v; & N_{ex} \leq 30 \\ aS_v + bS_p; & 30 < N_{ex} \leq 80 \\ S_p; & N_{ex} > 80 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Donde: } a = 1 - \frac{N_{ex} - 30}{50}; b = \frac{N_{ex} - 30}{50}$$

Los resultados de estabilidad obtenidos de la experimentación se presentan en forma gráfica en el siguiente apartado de Análisis de Resultados. En la Tabla 3 se presentan los umbrales del parámetro de daño para cada sector y nivel de avería, estimados del análisis de los resultados.

Análisis de los resultados

Los ensayos se han realizado con series de oleaje con periodos de pico 1,4 y 1,6 seg. Con estos periodos, para las alturas de ola que provocan la avería en el Talud Exterior, los números de Iribarren del talud,

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_0}}} \quad (8)$$

se encuentran alrededor de 3. Esto quiere decir que, al menos para el Talud Exterior, los ensayos se han realizado en el rango de periodos de mínima estabilidad. Por ello, se ha decidido utilizar como descriptor del oleaje en el análisis de resul-

Tabla 3						
Sección Avería	IM	EM	TC	C	TI	TE
IA	1,0	1,0	1,5	1,0	0,5	1,0
AI	2,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,5
ID	4,0	6,0	6,5	5,0	3,5	4,0
D	9,0	10,0	12,0	10,0	—	9,0
Umbral mínimo de parámetro de daño S para cada sector de dique y nivel de avería. Sectores del dique: Interior Morro (IM), Exterior Morro (EM), Talud Completo (TC), Coronación (C), Talud Interior (TI), Talud Exterior (TE). Niveles de avería: Iniciación de Avería (IA), Avería de Iribarren (AI), Inicio de Destrucción (ID), Destrucción (D).						

tados, el n.º de estabilidad o número de Hudson, que considera tan solo la influencia de la altura de ola:

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \quad (9)$$

Donde $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$ es la densidad sumergida relativa de las piezas del manto principal y ρ_s y ρ son las densidades de las piezas y del agua, respectivamente. Los datos de daño se clasifican en función del francobordo adimensional:

$$F_d = \frac{F}{D_{n50}} \quad (10)$$

Donde F es el francobordo, definido como la diferencia entre el nivel de la coronación, h_c , y el nivel medio del agua, d_s , (ver Figura 3). Para un dique, profundidad de agua, características del oleaje incidente y duración del estado de mar determinados, el daño deberá ser una función del n.º de estabilidad y del francobordo adimensional:

$$S = f(N_s, F_d) \quad (11)$$

Para un nivel de daño dado, $S = S_0$, la función (11) puede ser representada en un gráfico bidimensional que relacione el n.º de estabilidad para ese nivel de daño, N_{s0} , con el francobordo:

$$N_{s0} = f_0(F_d) \quad (12)$$

Si la función (12) tiene un mínimo para un francobordo determinado, este francobordo corresponderá al mínimo de estabilidad para el sector correspondiente del dique. Las funciones f_0 , obtenidas de la experimentación, correspondientes a cada sector son las que se analizan a continuación.

Comparación entre niveles de daño para los diferentes sectores

En los siguientes gráficos se presenta las curvas de estabilidad $N_{s0} = f_0(F_d)$, para cada una de las secciones del dique. Cada curva individual en las figuras corresponde a un nivel de daño diferente, definido por los valores del parámetro de daño indicados en la Tabla 3.

■ Talud Exterior.

La Figura 5 muestra los resultados de estabilidad para el Talud Exterior del tronco del dique.

Las líneas horizontales dibujadas a la derecha de la figura corresponden a los valores del número de estabilidad para los distintos niveles de daño correspondientes a diques no rebasables, ensayados por Van der Meer (1988) con oleaje irregular con el mismo periodo de pico, mismo n.º de olas y en una estructura de talud y porosidad similares a los de estos ensayos.

Como puede observarse en la figura, cada juego de datos, correspondiente a un nivel de avería diferente se ajusta bien mediante una línea recta. Esto quiere decir que existe un aumento lineal de la estabilidad del talud exterior con la disminución del francobordo. El francobordo de estabilidad mínima, para cualquier nivel de daño, corresponde siempre al de no rebase. La diferencia entre los valores del n.º de estabilidad para Destrucción e Inicio de Avería es menor para los francobordos positivos que los negativos, indicando una mayor fragilidad del talud exterior con los francobordos positivos.

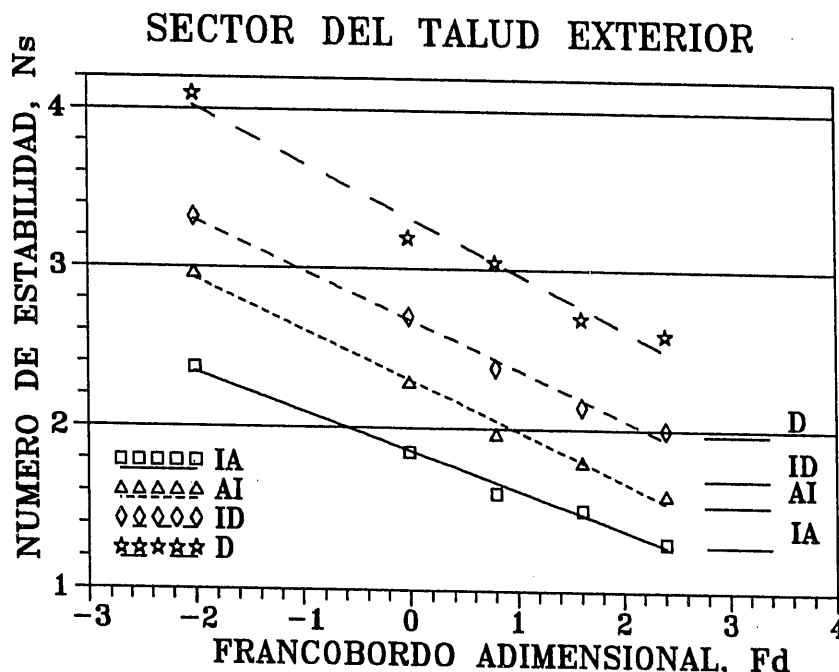
Cualquier avería en el dique que produzca una disminución del francobordo, incrementará la estabilidad del talud exterior. Como la deformación del propio talud exterior debida a la su avería, también incrementa su estabilidad, se concluye que el talud exterior se encuentra siempre en condiciones de equilibrio estable.

■ Coronación.

La Figura 6 muestra los resultados de estabilidad para el sector de la Coronación del tronco del dique. En este caso las curvas que mejor ajustan los juegos de resultados correspondientes a cada nivel de daño son parábolas de segundo orden con un mínimo en un francobordo ligeramente por debajo del francobordo nulo. Este francobordo de mínima estabilidad se mueve hacia francobordos menores al aumentar el nivel de daño, indicando una relación entre este mínimo y el nivel del seno de la onda sobre la coronación. La pendiente de la rama de la parábola correspondiente a los francobordos positivos es mayor que la correspondiente a los francobordos negativos, lo que significa que la estabilidad de la coronación aumenta más rápidamente con el aumento del francobordo positivo que con la disminución del francobordo negativo.

Cuando el francobordo es positivo, el desplazamiento de las piezas del manto principal se produce principalmente en la dirección del avance de la onda, hacia el Talud Interior, Figura 7, debido a la asimetría del flujo. A medida que disminuye el francobordo, la simetría del flujo aumenta y con ella la proporción de piezas que se desplazan hacia el Talud Exterior.

Si tenemos en cuenta tan sólo la influencia del francobordo, la coronación se encuentra en una situación inestable cuando los francobordos son positivos: cualquier daño en la coronación que provoque la disminución del francobordo implica una disminución de la estabilidad. Como esta fragilidad de la coronación, para los francobordos positivos, no ha sido observada en los ensayos, se concluye que el aumento de estabilidad debido al incremento de la anchura de la coronación que se deriva de la disminución del francobordo



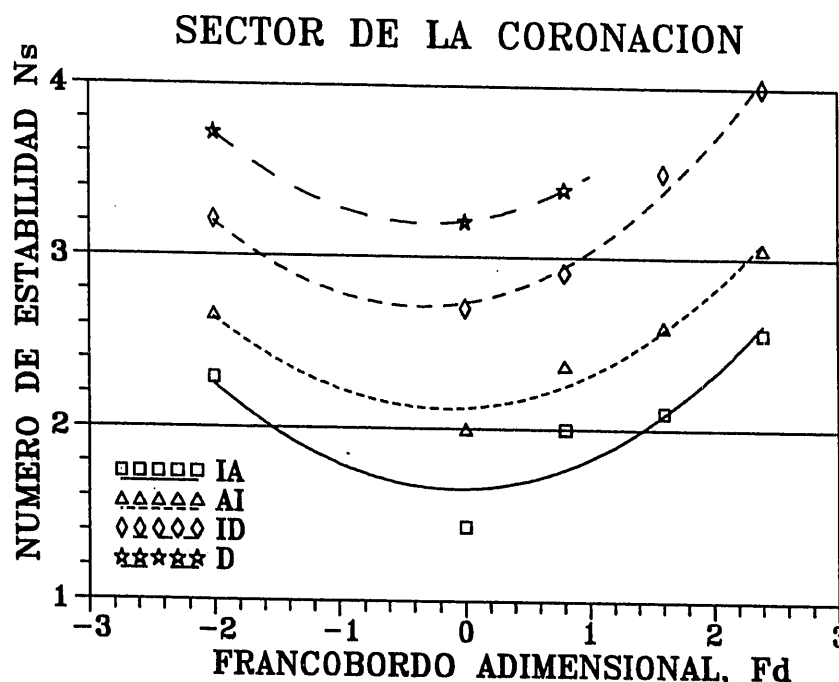
por avería, compensa la disminución de estabilidad por disminución del francobordo.

Figura 5. Curvas de estabilidad para el sector del Talud Exterior del tronco del dique.

■ Talud Interior.

La Figura 8 muestra los resultados de estabilidad para el sector del Talud Interior del tronco del dique. Debido a la elevada estabilidad de este sector, sólo los datos de Inicio de Avería muestran el comportamiento completo con la variación del francobordo. La curva ajustada en este caso es una parábola de 2.º orden con un mínimo en un

Figura 6. Curvas de estabilidad para el sector de la Coronación del tronco del dique.



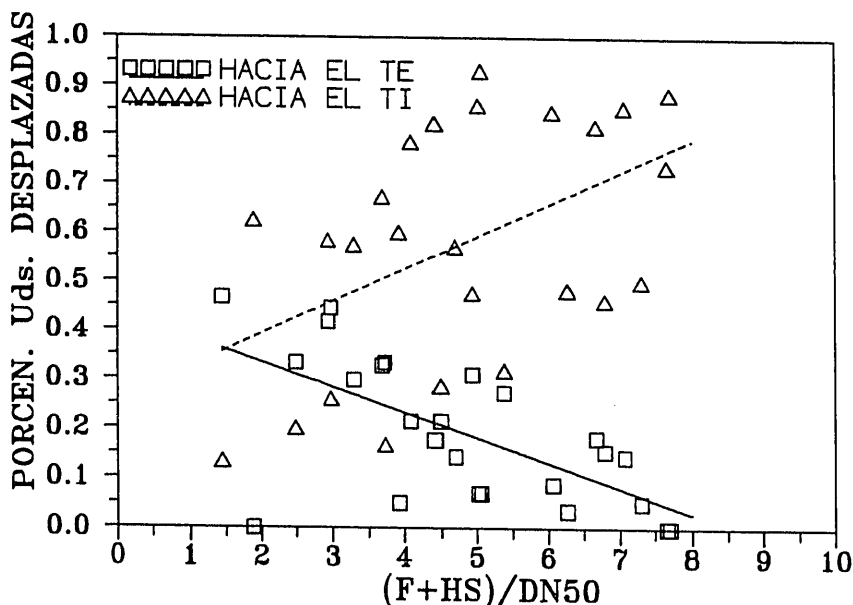
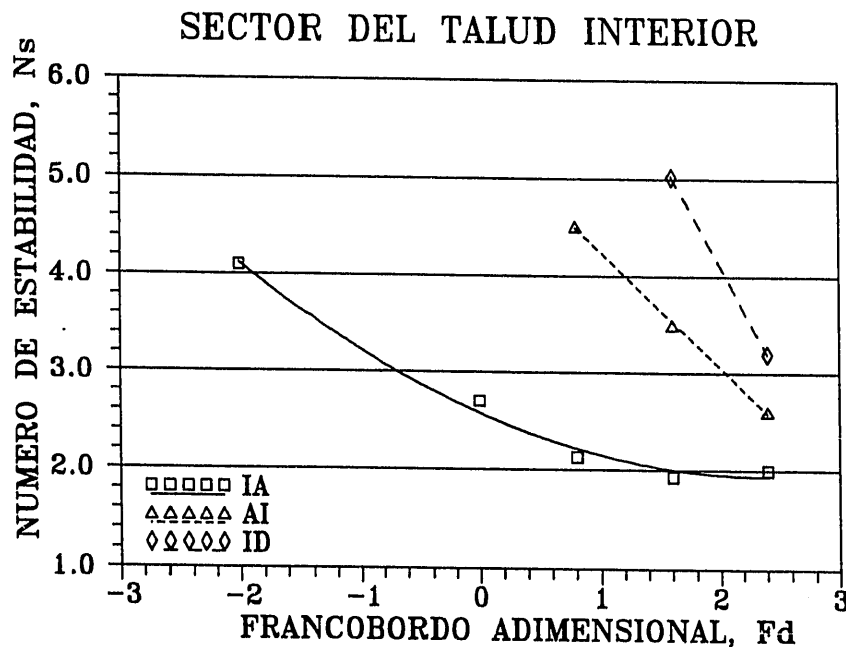


Figura 7. Porcentaje de unidades desplazadas desde la Coronación hacia los sectores del Talud Exterior (TE) y Talud Interior (TI).

valor del francobordo adimensional alrededor de 2. Las curvas correspondientes a la Avería de Iribarren e Inicio de Destrucción se ajustan con líneas rectas por no disponer de mas información, aunque es de suponer que su desarrollo con el francobordo lleve a un mínimo de estabilidad en un francobordo positivo mayor que 2. No ha podido obtenerse la destrucción de este sector en ninguno de los ensayos.

Una característica destacable de este sector es que la distribución del daño, para francobordos positivos es mucho mas irregular que en el resto de los sectores. El daño se concentra en determinados puntos que dependen de las características del chorro de rebase, a su vez influenciadas por la geometría del Talud Exterior y de la Coronación. Como consecuencia de esta concentra-

Figura 8. Curvas de estabilidad para el sector del talud interior del tronco del dique.



ción del daño, los umbrales del parámetro de daño para un nivel de avería determinado, indicados en la Tabla 3, son inferiores en este sector al resto de los sectores del tronco del dique. Esta irregularidad y concentración de la avería provocan asimismo que para los francobordos positivos, este sector sea extremadamente frágil, es decir, la diferencia entre los números de estabilidad para dos niveles de avería extremos, es muy pequeña y por lo tanto la reserva de estabilidad, una vez iniciada la avería es menor que en los otros sectores del tronco del dique.

La influencia del francobordo en la estabilidad de este sector, especialmente para niveles de daño medios o elevados, es muy grande: la estabilidad disminuye rápidamente con el aumento del francobordo, hasta alcanzar el mínimo para un valor positivo del mismo. Para francobordos negativos este sector es muy estable.

■ Talud Completo.

La Figura 9 muestra los resultados de estabilidad correspondientes a los diferentes niveles de daño en el sector del Talud Completo, que comprende el Talud Exterior, Coronación y Talud Interior. Al igual que en el caso del Talud Exterior, las líneas horizontales situadas a la derecha de la figura corresponden al valor del n.º de estabilidad obtenido por Van der Meer (1988), para dique y oleaje de características similares, en el caso de diques no rebasables.

En este caso, el mejor ajuste a cada serie de datos corresponde a parábolas de 2.º orden, en lugar de las líneas rectas obtenidas en el caso del Talud Exterior. El francobordo de mínima estabilidad para cada nivel de daño, correspondiente al mínimo de las parábolas, se encuentra en el francobordo de no rebase. Aunque el daño en este sector, para francobordos positivos, está dominado por el daño en el Talud Exterior, la influencia del daño en la coronación provoca mínimos relativos para francobordos positivos intermedios. Estos mínimos podrían ser mas marcados en el caso de que el Talud Exterior fuera mas estable, por ejemplo si la pendiente del mismo fuera menor. La controversia existente sobre la existencia de estos mínimos, Van der Meer (1988), Ahrens (1989), queda así explicada: si la avería sobre el talud exterior es dominante, no aparecerá este mínimo, que corresponde al comportamiento de la Coronación.

■ Sector Exterior del Morro.

La Figura 10 muestra los resultados de estabilidad para los diferentes niveles de daño correspondientes al sector Exterior del Morro. Las curvas ajustadas a cada nivel de daño son líneas rectas, con el mínimo de estabilidad en el francobordo de no rebase. El comportamiento del sector Exterior del Morro es pues, similar al del Talud Exterior del tronco del dique, mostrando un aumento lineal de la estabilidad con la disminución del francobordo.

La forma troncocónica del sector provoca que un menor n.º de piezas quede involucrado en una avería determinada. Debido a ello, la dispersión

de los datos es mayor que en el Talud Exterior del tronco del dique. La separación entre las rectas ajustadas es ligeramente menor para los francobordos negativos. Esto sugiere una mayor fragilidad de este sector del morro en el caso de diques sumergidos. Este comportamiento, contrario al observado en el Talud Exterior del tronco del dique, puede ser debido a la geometría troncocónica del morro: para diques sumergidos. Sólo un pequeño número de piezas cercanas a la coronación quedan dentro del área de daño cuando el dique está sumergido, por lo que la formación del perfil en «S» en la sección averiada se alcanza sólo mediante la extensión de la avería. Como compensación, el efecto de la difracción sobre el morro disminuye el flujo de descenso, con un efecto estabilizante. Como resultado, el comportamiento a estabilidad de este sector del morro es bastante similar al del Talud Exterior del tronco del dique.

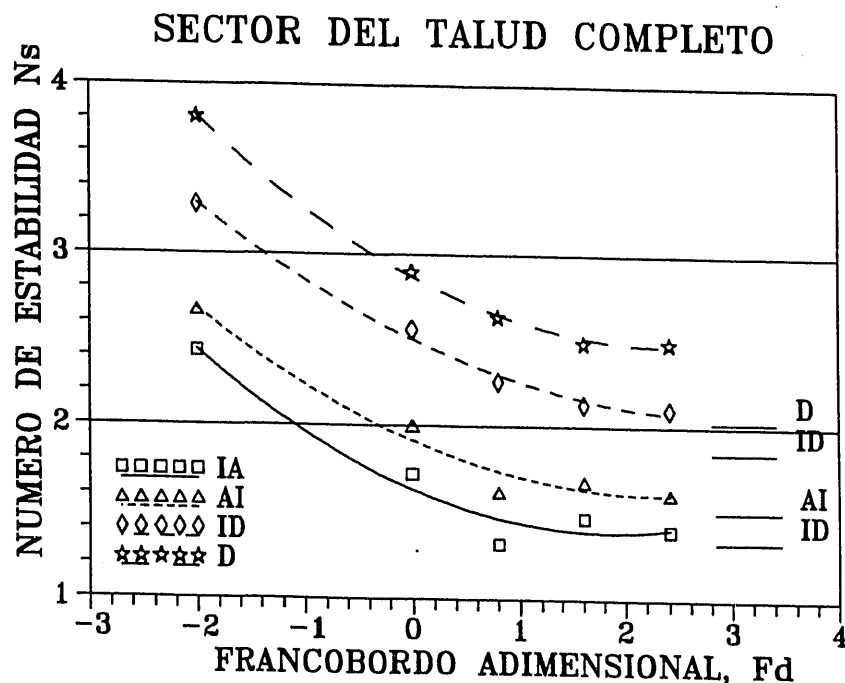
■ Sector Interior del Morro.

La Figura 11 muestra los resultados de estabilidad para cada nivel de daño, obtenidos para el sector Interior del Morro del dique. Las curvas ajustadas a los datos correspondientes a cada nivel de avería son parábolas de 2.º orden. el mínimo de estas parábolas corresponde al francobordo de no rebase. Este mínimo ha sido alcanzado en el caso de Iniciación de Avería para el máximo francobordo ensayado.

La estabilidad del sector Interior del Morro se incrementa rápidamente a medida que disminuye el francobordo. Como consecuencia, este sector es muy estable en diques sumergidos, mientras que es el menos estable del dique cuando se encuentra completamente emergido. La separación entre las curvas correspondientes a los diferentes niveles de daño es muy pequeña para este sector, y disminuye al aumentar el francobordo. Esta característica implica que este sector es muy frágil, es decir, una vez iniciada la avería se requieren relativamente pequeños incrementos de la sollicitación para pasar a niveles de avería superiores.

Para diques sumergidos, el flujo sobre este sector del morro es prácticamente simétrico, y si se produce rotura, esta acaece sobre un colchón de agua, que protege el manto. El flujo sobre el morro es mayormente tangencial y las fuerzas del flujo y gravitatorias trabajan en direcciones diferentes. El desplazamiento de las piezas se inicia en las proximidades de la coronación, donde el flujo es mayor.

Para francobordos positivos, la combinación de la refracción y difracción sobre el morro incrementa la altura de ola, provocándose la rotura de la misma en las proximidades de la intersección del radio del morro normal a la dirección de propagación con el nivel medio. La rotura, generalmente en voluta, provoca un chorro con una clara componente descendente, que impacta sobre las piezas del talud principal, expuesta por el paso del seno anterior. La combinación del impacto del chorro descendente y la gravedad desplaza las piezas en la dirección de propagación del oleaje y hacia abajo, lejos de la sección dañada, por lo que



no contribuyen a la formación de una berma protectora. Como la sección deformada no es mas estable que la original, el daño progresa rápidamente, lo que explica la fragilidad de este sector.

Figura 9. Curvas de estabilidad para el sector del Talud Completo del tronco del dique.

Comparación entre sectores

La comparación entre sectores se puede realizar analizando el comportamiento de los diferentes sectores del dique para niveles de daño determinados. Como un ejemplo representativo, en

Figura 10. Curvas de estabilidad para el sector Exterior del Morro.

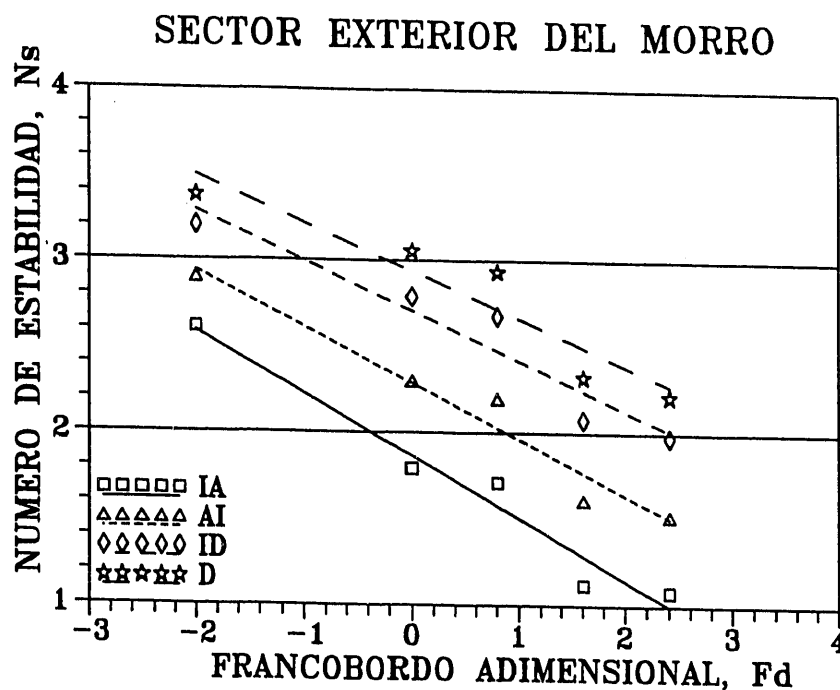
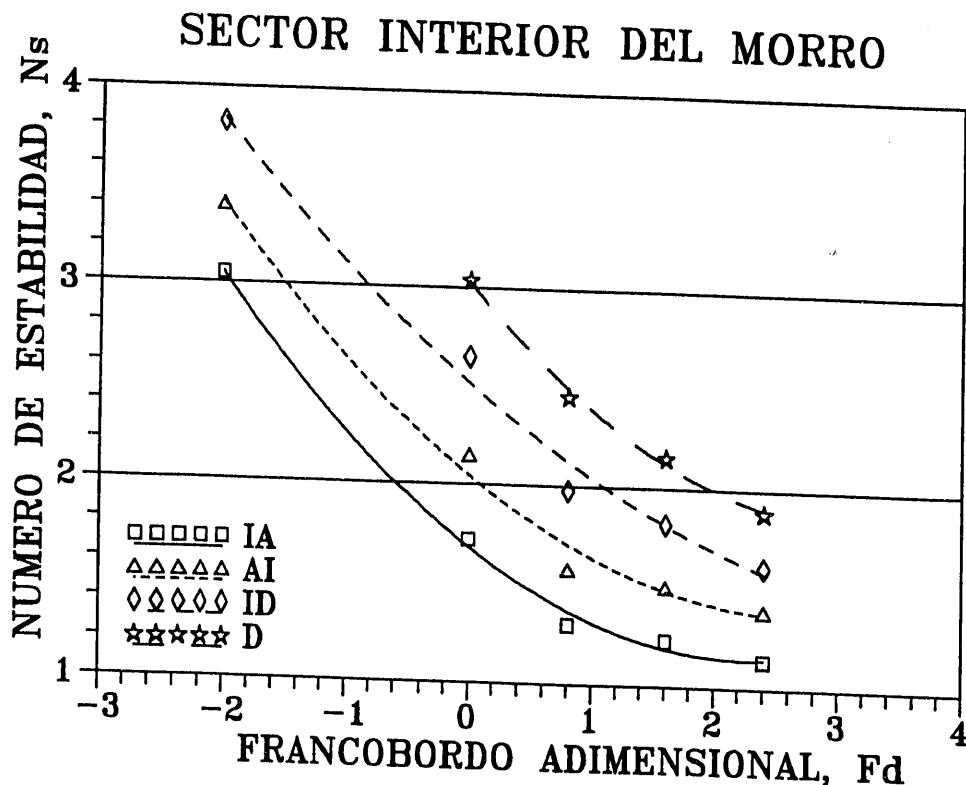


Figura 11. Curvas de estabilidad para el sector Interior del Morro.



este apartado se utilizará la Avería de Iribarren como nivel de daño.

La Figura 12 muestra los resultados de estabilidad para la Avería de Iribarren, cada juego de datos correspondiente a un sector diferente del dique. Las datos y curvas ajustadas han sido tomados de las figuras del Apartado anterior.

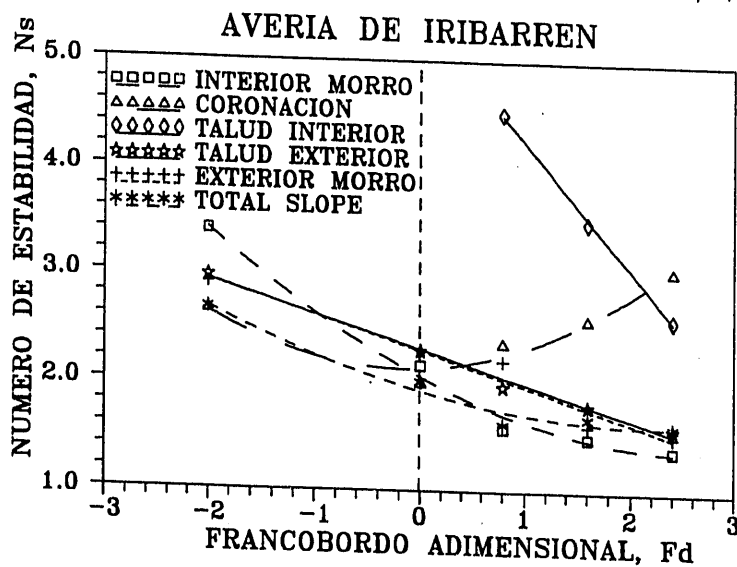
Para francobordos positivos, el sector Interior del Morro es el menos estable del dique. Para $F_d \geq 0$, este sector forma la envolvente inferior (mínima estabilidad) de todas las curvas correspondientes a todos los sectores ensayados. Esta conclusión se hace también extensiva a los diques no rebasables. Debido al rápido incremento de la estabilidad con la sumergencia del dique, el sec-

tor Interior del Morro es el mas estable del dique, exceptuando el Talud Interior del tronco, cuando los francobordos negativos son importantes. Las rectas correspondientes al Talud Exterior del tronco y al sector Exterior del Morro son prácticamente coincidentes, corroborando su comportamiento similar a estabilidad.

Ciñéndonos a los sectores del tronco del dique, el Talud Exterior es el menos estable para $F_d \geq 0.5$. Para francobordos inferiores, la Coronación es el sector menos estable del tronco del dique. El Talud Interior es el sector mas estable del dique para $F_d \geq 2$. Para francobordos mayores es la Coronación el sector mas estable del dique. Debido a esto, si el francobordo es elevado y las piezas del manto principal son las mismas en la Coronación que en el Talud Posterior, se puede producir avería en el Talud Posterior sin que la Coronación haya sufrido daño.

La curva correspondiente al Talud Completo refleja la influencia del daño de los sectores que la integran: para francobordos positivos sigue el comportamiento del Talud Exterior y para francobordos negativos se aproxima a la curva de la Coronación. Como la Coronación es mas estable que el Talud Exterior para francobordos positivos, el daño producido en la parte de la coronación del Talud Completo suele proceder de la progresión del daño provocado en la parte del talud exterior del Talud Completo. Debido a ello, varios ensayos muestran fuertes averías en el la parte de la coronación del Talud Completo mientras que el sector de la Coronación sólo muestra averías ligeras. Para francobordos positivos elevados, el daño en la parte de la coronación del Talud Completo puede provenir asimismo de la progresión del daño en la parte del talud interior.

Figura 12. Comparación entre las curvas de estabilidad de los seis sectores del dique, para Avería de Iribarren.



Conclusiones y recomendaciones

El daño en un rompeolas sumergido es la respuesta del manto a las diferentes condiciones de flujo y estabilidad que se producen en los distintos sectores en los que se puede dividir el dique. Cada uno de estos sectores tiene una respuesta a estabilidad diferente a unas determinadas condiciones de oleaje incidente.

La estabilidad de los diques rebasables tiene una fuerte dependencia del francobordo. Cualquier tipo de evaluación comparativa de resultados de estabilidad debe realizarse con niveles de avería bajos o intermedios, como máximo Avería de Iribarren. Niveles de avería superiores provocan cambios en la geometría de la coronación que afectan al comportamiento tanto de la coronación como del resto de los sectores del tronco.

La estabilidad del sector Interior del Morro es mas dependiente del francobordo que el Talud Exterior del tronco o el sector Exterior del Morro. Para diques completamente sumergidos, el sector Interior del Morro es el mas estable del dique, si exceptuamos el Talud Interior. Para diques emergidos, el sector Interior del Morro es el menos estable del dique. Unido a la baja estabilidad, este sector del morro es el mas frágil del dique para francobordos positivos, lo que se traduce en una baja reserva de estabilidad, una vez iniciada la avería.

El sector Exterior del Morro se comporta de una manera similar al Talud Exterior del tronco del dique, es decir, su estabilidad aumenta linealmente con la disminución del francobordo. Como la Coronación presenta un mínimo de estabilidad para francobordos ligeramente inferiores a cero, la aparición de mínimos de estabilidad en el sector del Talud Completo depende de la relación de estabildades entre el Talud Exterior y la Coronación: si el talud exterior es muy estable (pendientes del talud pequeñas), el mínimo de la coronación será dominante y aparecerá un mínimo de estabilidad en el Talud Completo.

El sector del Talud Interior presenta una avería irregular y concentrada en las áreas de impacto del chorro de rebase. Dado que el impacto sobre las piezas del manto sólo se produce con el dique emergido, la estabilidad de este sector es la mas dependiente del francobordo de todos los sectores del dique. Dada la concentración de las averías, para diques con francobordos elevados, este sector puede ser menos estable que el de la Coronación, además de ser considerablemente frágil.

Si el objetivo de la experimentación en modelo físico es la optimización de los pesos de las piezas del manto principal para la obtención de condiciones de seguridad similares en todos los sectores del dique, se debe determinar en los ensayos las curvas de estabilidad de cada uno de los sectores. En el caso de los sectores de los morros, se impone los ensayos tridimensionales. El conocimiento de los tamaños de las piezas necesarios en cada sector ayudará a la optimización del material de cantera o al diseño de los pesos apropiados en piezas artificiales en su caso, permitiendo diseños mas económicos de los diques.

Agradecimientos

Los autores agradecen al National Research Council of Canada por la ayuda aportada a esta investigación, correspondiente al soporte físico e informático para la experimentación. Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por la Dirección General de Puertos y Costas y la Dirección General de Investigación Científica y Técnica del MEC, a través de los proyectos PB87-0800 y PB89-0381. La estancia del primer autor en Canadá fue subvencionada por una beca del Programa para el Perfeccionamiento y Movilidad del Personal Investigador de la DGICYT del MEC.

Bibliografía

- Ahrens, J.P., 1989. «Stability of Reef Breakwaters». *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 115, No. 2, March, 1989.
- Funke, E.R. and Mansard, E.P.D., 1984. «The NRC "Random" Wave Generation Package». NRC Hydraulics Laboratory Technical Report TR-HY-002, March.
- Grace, P.J., 1989 «Investigation of Breakwater Stability at Presque Isle Peninsula; Erie Pennsylvania». U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center. CERC Technical Report 89-3, Vicksburg, MS.
- Jerisen, O.J., (1984). «A monograph on rubble mound breakwaters». Danish Hyd. Institute. Denmark.
- Kobayahi, N., Wurjanto, A. and Cox, D.T., 1990. «Rock Slopes Under Irregular Wave Attack». *Proc. 22nd Conf. on Coastal Eng., ASCE, Delft, 1990* . pp 1307-1319.
- Losada, M.A., Desire, J.M. and Alejo L.M., 1986. «Stability of Blocks as Breakwater Armor Units». *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 112(11), 2392-2401.
- Losada, M.A., Kobayashi, N. and Martin, F.L., 1992. «Armor Stability on Submerged Breakwaters». *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol 118, No.2, March/April.
- Magoon, O.T., Sloan, R.L. and Foote, G.L., 1975. «Damages to Coastal Structures». *Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., ASCE, Copenhagen, 1975*.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R., 1987. «On the Reflection Analysis of Irregular Waves». National Research Council of Canada, Hydraulics Laboratory Technical Report, TR-HY-017.
- Raichlen, F., 1972. «Armor Stability of Overtopped Breakwaters». *Journal of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, Proceedings of ASCE, WW2, Vol. 98, May, 1972, Discussion of Paper 8138, pages 273-279*.
- U.S. Army Engineering District, Los Angeles Corps of Engineers, (1965). «Dana Point Harbor, Dana Point, California». General Design Memorandum No.1, September, 1965.
- Van der Meer, J.W., 1988. «Rock Slopes and Gravel Beaches under Wave Attack». Doctoral thesis, Delft University of Technology. Also: Delft Hydraulics Communication No. 396.
- Vidal, C., Losada, M.A. and Medina, R., 1991. «Stability of Mound Breakwater's Head and Trunk». *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, Vol. 117, No. 6. Nov/Dec, 1991.
- Walker, J.R., Palmer, R.Q. and Dunhan, J.W., 1976. «Breakwater Back Slope Stability». *Civil Engineering in the Oceans*.