

neralmente perpendiculares a la costa) y teniendo en cuenta el hecho de que el frente de onda tiende a orientarse paralelo a la orilla, según se va aproximando a ésta, la incidencia del oleaje sobre el espigón será, o frontal o el frente de la ola formará un ángulo próximo a los 90° con el eje del mismo.

El objeto del trabajo ha sido, pues, el comportamiento, respecto de la estabilidad, de los espigones de defensa frente a la incidencia frontal o quasi-frontal del oleaje, y en dicho estudio se ha analizado, cuantitativa y cualitativamente, la evolución de los daños a lo largo del tronco del espigón, con el fin de obtener la información necesaria para poder llevar a cabo un diseño más económico de dichas obras.

Dicho trabajo ha consistido en la realización de dieciséis ensayos, con oleaje irregular, correspondientes a la combinación de dos valores distintos por cada una de las variables tenidas en cuenta en el desarrollo del mismo, y que fueron:

- Dos periodos de pico: 9 y 12 seg.
- Dos profundidades al pie del morro: 4,0 y 7,0 metros.
- Dos disposiciones del fondo del mar: fondo plano y pendiente del 3 %.
- Dos orientaciones del eje del espigón respecto a la dirección del frente de onda del oleaje: 0° y 10° .

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS OLAJES

Los oleajes utilizados para la realización de los ensayos han estado asociados a espectros tipo Jonswap cuyas características más importantes han sido las siguientes:

	H_s (m)	T_p (seg)	γ
OLAJE 1	6,0	9	3,3
OLAJE 2	6,0	12	3,3
OLAJE 3	3,4	9	3,3
OLAJE 4	3,0	12	3,3

Las alturas de ola significantes tenidas en cuenta en la definición de los espectros teóricos se han elegido en base a la condición de compatibilidad de las amplitudes de ola con las profundidades y periodos considerados para la realización de los ensayos.

Los sucesivos temporales a que ha estado sometida la sección han verificado los siguientes programas de ensayos:

d (m)	$(H_s)_0$ (m)	INCREMENTOS $(H_s)_0$ (m)
7,0	2,0-6,0	0,50
4,0	0,5-3,5	0,25

Estas amplitudes de ola consideradas están referidas a profundidades en zona de generación (zona de transición, $0,04 < d/L < 0,5$).

Se han considerado dos direcciones del frente de onda del oleaje, una de ellas frontal, es decir, aquella que forma un ángulo de 0° con el eje del espigón, y otra en la que dicho ángulo ha sido de 10° .

3. ESCALAS ADOPTADAS

Una vez analizadas las variables a tener en cuenta en los ensayos y teniendo en cuenta los medios disponibles en el laboratorio, se adoptó la escala $\lambda_1 = 1/25$ para los ensayos en los que la profundidad fue de 7,0 m.

Al ser la relación existente entre las profundidades elegidas para la realización del estudio (7,0 y 4,0 m), prácticamente la misma que la de los cuadrados de los periodos de pico (12^2 y 9^2 seg), el comportamiento de la sección en el caso de profundidad 7,0 m cuando está sometida a los temporales de periodo de pico 12 seg, será el mismo que en el caso de profundidad 4,0 m y periodo de pico 9 seg, siempre que la escala elegida para estos últimos ensayos sea $\lambda_2 = (7/4) \cdot (1/25) = 1/14$. Esto es consecuencia de que, en la semejanza de Froude, los tiempos, en modelo y prototipo, están relacionados por medio de la raíz cuadrada de la escala ($\lambda^{1/2}$).

Según esto, los ensayos en los que la profundidad considerada fue de 4,0 m, la escala ha sido $\lambda_3 = 1/14$, mientras que aquéllos en que la profundidad fue de 7,0 m, la escala ha sido $\lambda_1 = 1/25$.

Un estudio realizado por Hudson (1975) (1), indica que los efectos de escala debidos a las fuerzas de viscosidad, en los ensayos de estabilidad de diques de escollera, pueden despreciarse si el número de Reynold, R_N , definido como

$$R_N = \frac{d^{1/3} \cdot H^{1/2} \cdot l_e}{\delta}$$

donde:

g = aceleración gravitatoria, m/seg^2

H = altura de ola, m

l_e = longitud característica del elemento, m

δ = viscosidad cinemática, m^2/seg

es igual o mayor que $3 \cdot 10^4$, en el modelo.

En los ensayos con profundidad de agua $d = 7,0$ m, la altura de ola límite que verifica dicha relación es $H = 1,10$ m y para $d = 4,0$ m, es $H = 0,61$ m. Ambas alturas son claramente inferiores a sus correspondientes de iniciación de averías, por lo que la influencia de las fuerzas viscosas en los resultados puede considerarse despreciable.

4. CARACTERÍSTICAS DEL TANQUE DE ENSAYOS

Los ensayos se han realizado en un tanque de 46,0 m de longitud, 6,5 m de anchura y 2,30 m de profundidad en el extremo donde se ubica el generador de oleaje. A

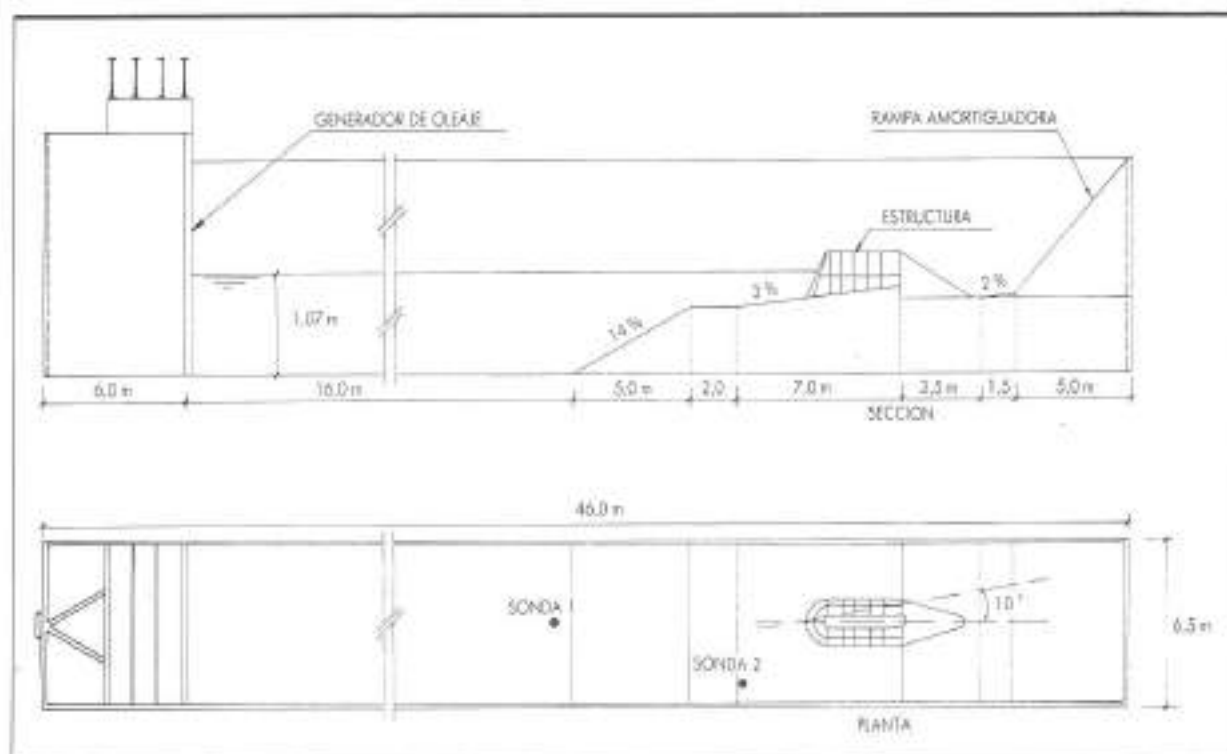


FIGURA 1. Sección del tanque de ensayos.

16,0 m de éste se encuentra una rampa del 14 % que efectúa la transición de profundidades intermedias a profundidades reducidas. En el otro extremo, el tanque dispone de una rampa amortiguadora de oleaje con objeto de eliminar las reflexiones que pudieran alterar las condiciones del oleaje generado. En la figura 1 se representa el esquema del tanque utilizado en los ensayos.

El tanque va equipado con un generador electrohidráulico de desplazamiento horizontal, capaz de producir tanto ondas monocromáticas como oleaje irregular.

5. SISTEMA DE TOMA DE DATOS

La toma de datos se ha llevado a cabo por medio de dos sondas resistivas, una de ellas situada frente al generador de oleaje y a 16,0 m de éste, y la otra frente a la sección.

La distancia entre la sonda de referencia y el generador de oleaje permite la formación de tres longitudes de onda en el caso más desfavorable, es decir, el caso en que el período de pico es 12 seg y la escala $\lambda_g = 1/14$, por lo que se considera que el oleaje alcanza dicha sonda prácticamente desarrollado.

En cada ensayo se registraron los datos, para cada escalón de altura de ola, en ambas sondas, de manera que se pudiera conocer la relación existente entre la altura de ola incidente y su correspondiente en genera-

ción, dato importante dada la limitación impuesta sobre la altura de ola incidente por efecto del fondo.

6. CONSTRUCCION DEL MODELO

La elección del peso de los elementos se hizo en base a un estudio teórico, en el que, teniendo en cuenta la geometría del fondo y las características de los temporales de ensayo compatibles con éste, se calculó, por medio de la fórmula de Hudson, el peso que, en principio, aseguraba la estabilidad. Finalmente se consideró un peso inferior al obtenido en el estudio teórico con el propósito de que se produjeran averías a partir de un determinado temporal.

Las características de los elementos que constituyen los distintos mantos han sido las siguientes:

	w_m (g)	δ_m (g)
MANTO PRINCIPAL	209,22	2,69
MANTO SECUNDARIO	18,65	2,66

Para el núcleo, se eligió una arena que en el momento de su colocación en el modelo se compactó debidamente de manera que su comportamiento fuera correcto durante el desarrollo de los ensayos. En la figura 2 se



FOTO 1. Disposición general del modelo.

representa la sección del modelo utilizada en el estudio.

Los ensayos con pendiente del fondo $m = 0,30$ se llevaron a cabo prolongando la rampa lo necesario para que toda la sección quedara sobre ella.

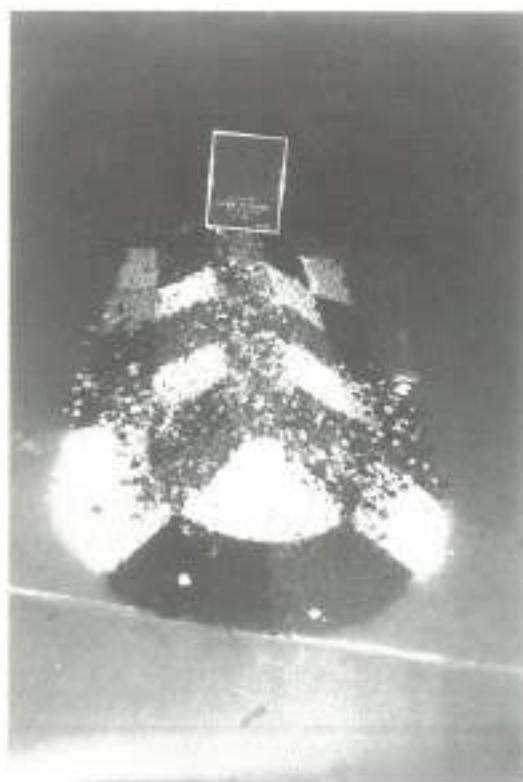


FOTO 2. Distribución de los arenales a lo largo de la estructura.

El espigón se dividió en 28 sectores, 14 de ellos a cada lado y simétricos respecto a su eje longitudinal. Dichos sectores se dispusieron, longitudinal y transversalmente, de diferentes colores, de manera que se facilitara el control de los desplazamientos de los elementos de escollera.

7. METODOLOGIA DE LOS ENSAYOS

De los 16 ensayos programados inicialmente, ya vimos anteriormente que cuatro de ellos no fue necesario realizarlos, concretamente los correspondientes a profundidad 4,0 m y período de pico 9 seg.

El procedimiento seguido quedó estructurado fijando las variables en el siguiente orden, pendiente del fondo, incidencia del oleaje, profundidad y período de pico. Según esto, los ensayos quedaron definidos tal y como se muestra en el cuadro 1.

Antes de comenzar cada ciclo de oleaje se sometió la sección durante 30 min a un oleaje caracterizado por una altura significativa de 1,5 m para los ensayos con profundidad igual a 7,0 m, mientras que la altura de ola fue de 0,5 m en los ensayos con profundidad 4,0 m. Con ello se pretendía conseguir una redistribución de los elementos de escollera de manera que el comportamiento de la sección se produjera más de acuerdo con la realidad.

Todos los ensayos se llevaron a cabo con una duración, por cada escalón de altura de ola, equivalente a cinco horas en prototipo.

Los programas no se complementaron en todos los ensayos ya que unas veces se alcanzó la ruina de la sección con alturas inferiores a las máximas previstas para el ensayo y otras porque se producía un elevado número de roturas de ola por efecto del fondo lo que

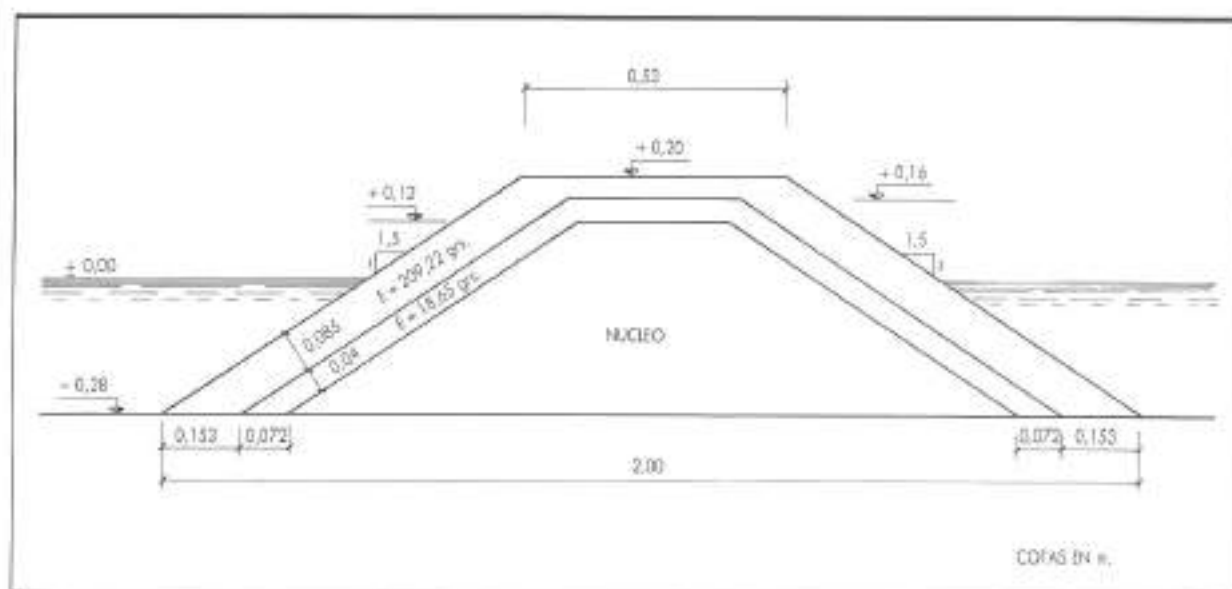


FIGURA 2. Sección transversal del modelo.

ENSAYO	m		d(m)	T _p (s)
1	0.00	0°	7	9
2			4	12
3			4	9
4			4	12
5	0.00	10°	7	9
6			4	12
7			4	9
8			4	12
9	0.00	0°	7	9
10			4	12
11			4	9
12			4	12
13		10°	7	9
14			4	12
15			4	9
16			4	12

CUADRO 1.

impedía obtener más información a pesar de aumentar la altura de ola en generación (H_g).

Por cada ciclo de oleaje se efectuó el recuento de los elementos desplazados de su posición inicial una distancia superior a la longitud del lado del cubo equivalente, sin que se reparasen los daños producidos al término de cada ciclo, de manera que el estado final de la sección, al acabar cada uno de ellos, coincidía con el estado inicial del ciclo siguiente.

8. RESULTADO DE LOS ENSAYOS

Los daños se han calculado por el número de elementos desplazados de su posición inicial en cada sector y para cada altura de ola.

En los ensayos con incidencia frontal ($\alpha = 0^\circ$), de cada par de sectores simétricos se consideró aquel en el que el porcentaje de averías fue mayor, de manera que los resultados quedaran del lado de la seguridad.

En los ensayos con incidencia oblicua se tuvieron en cuenta las averías producidas tanto en el lado expuesto ($\alpha = +10^\circ$) como en el lado abrigado ($\alpha = -10^\circ$).

El tratamiento de los resultados se llevó a cabo de dos formas. Una de ellas consistió en el análisis de la estabilidad del espigón desde el punto de vista de la influencia de cada una de las variables (período de pico, profundidad, oblicuidad del oleaje incidente y pendiente del fondo). La otra forma consistió en el estudio de la evolución de las averías a lo largo del espigón, para lo cual se obtuvo el número de estabilidad (2).

$$N_s = \frac{\gamma_a^{1/3} \cdot H_i}{(S_e - 1) \cdot W_a^{1/3}} = (K_D \cdot \cot \alpha)^{1/3}$$

donde:

- γ_a = peso específico del elemento, Tm/m³
- H_i = altura de ola a pie de obra, m
- S_e = relación entre el peso específico del elemento y el del agua en el que se encuentra
- W_a = peso del elemento estable, Tm
- K_D = coeficiente de estabilidad
- $\cot \alpha$ = pendiente del talud del manto exterior

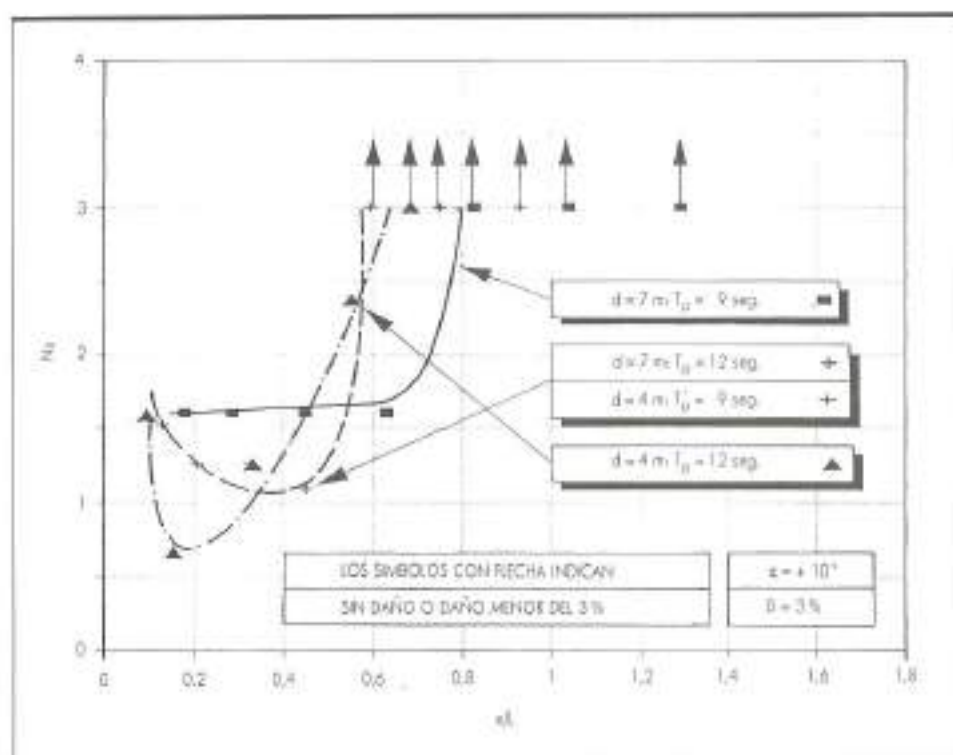


FIGURA 3. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $\alpha = +10^\circ$ y diferentes períodos.

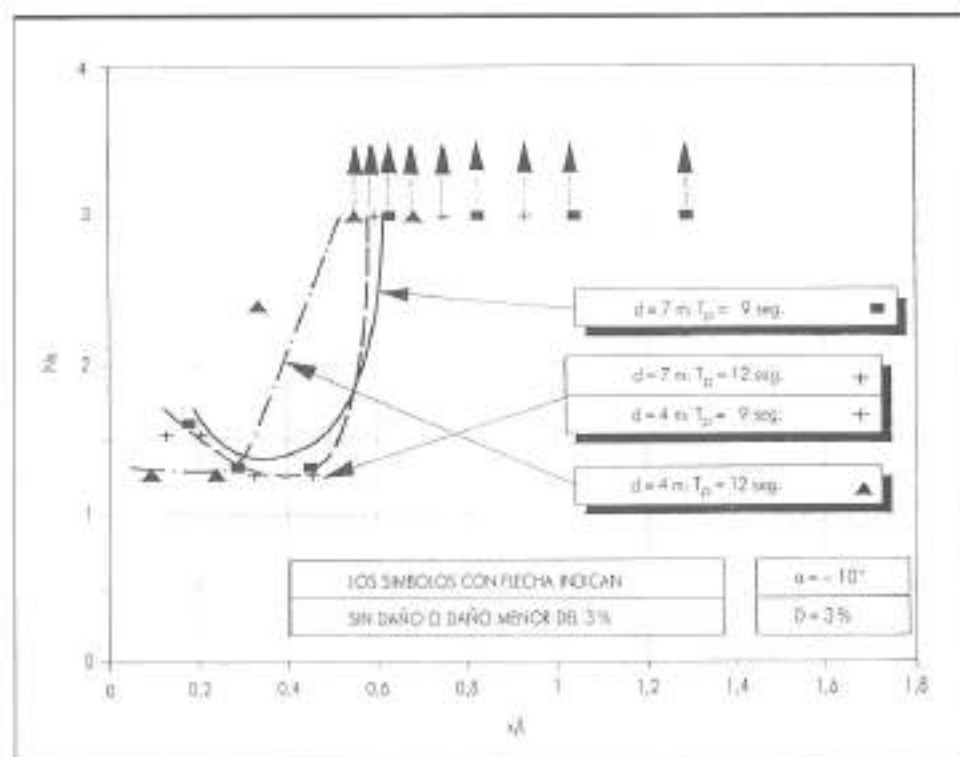


FIGURA 4. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $\alpha = -10^\circ$ y diferentes períodos.

en función de una variable adimensional que relaciona las distintas posiciones de los sectores con la longitud de onda correspondiente a la profundidad a pie de morro.

En todos los casos el nivel de daños de referencia fue el 3 %.

8.1. INFLUENCIA DE LAS DISTINTAS VARIABLES

Influencia del período de pico, T_p . Según se deduce de la comparación de resultados (Figs. 3 y 4) los comportamientos más inestables han correspondido al oleaje de período más alto ($T_p = 12$ seg) y, fundamentalmente, en los casos de profundidad en el morro menor ($d = 4,0$ m).

La hipótesis de que el grado de estabilidad disminuye con el período mayor solamente se comprueba que es válida para la zona del morro y su entorno próximo ($x/L < 0,5$). Sin embargo, según nos alejamos del morro la tendencia parece invertirse, si bien el bajo grado de averías producido solamente permite determinar el umbral inferior del valor de N_s .

El hecho de que se hayan ensayado solamente dos valores del período, T_p , impide obtener conclusiones más sólidas que puedan ser extendidas a un rango mayor.

Influencia de la profundidad, d . Lógicamente, cuanto mayor es la profundidad al pie del morro del espigón existe mayor probabilidad de que lleguen al mismo olas de altura mayor. Sin embargo, la aparición de averías en el morro y sus proximidades se ha producido a unas

alturas de ola bastante inferiores a las que impone la limitación por rotura de la ola.

En la figura 5 se puede apreciar cómo la mayor profundidad produce menores grados de estabilidad, tanto en la zona próxima al morro como en el resto de la estructura.

Influencia de la pendiente del fondo, m . En general, se puede afirmar que es la variable que mayor influencia ha tenido en el comportamiento de la sección ya que los daños aumentan considerablemente en los ensayos con pendiente del fondo, sobre todo en los sectores próximos al morro. Según nos alejamos del morro, el nivel de estabilidad tiende a igualarse (Figs. 6 y 7).

Influencia de la oblicuidad del oleaje, α . En las figuras 8 y 9 se puede observar la influencia del ángulo de incidencia del frente de ola en el comportamiento estructural del manto de protección del espigón.

En la zona próxima al extremo del espigón ($x/L < 0,5$) se puede observar un parecido grado de estabilidad para todas las hipótesis de oblicuidad, en el caso de menor período. Los valores mínimos de N_s oscilan alrededor de $N_s = 1,0$ para $D = 3$ % y se obtienen en el entorno $0,2 < x/L < 0,5$.

Esta apreciación coincide con lo observado sobre el comportamiento estructural de los morros de rompeolas ante el oleaje (3). Los mayores índices de averías se suelen producir en la zona interior al punto de tangencia del extremo y no exactamente en el punto más sobresaliente. La causa estriba en que en esa zona se pro-

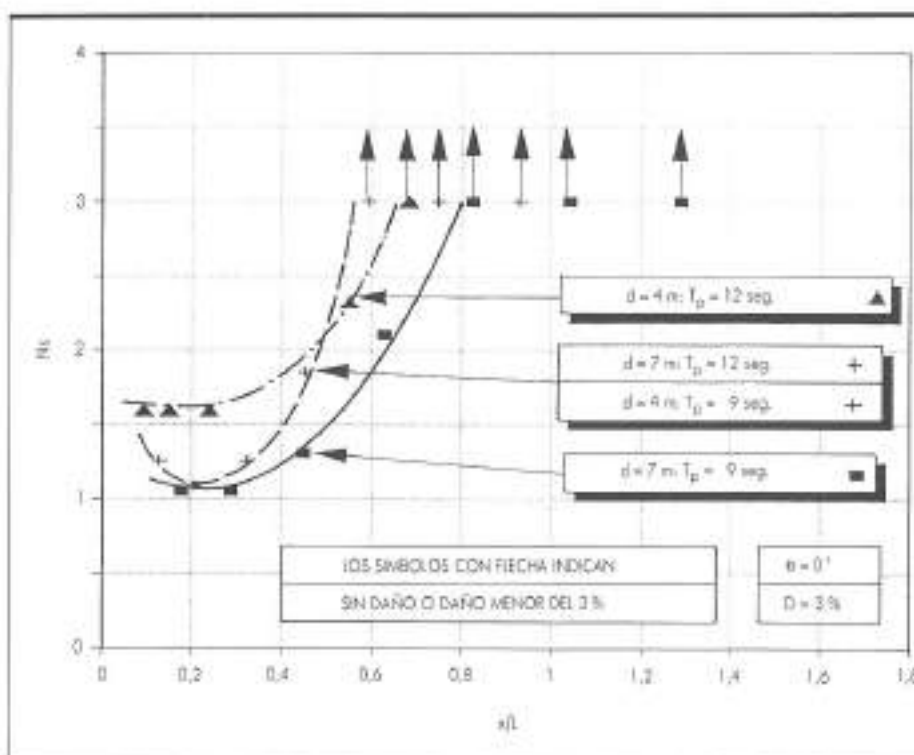


FIGURA 5. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $\alpha = 0^\circ$ y diferentes profundidades.

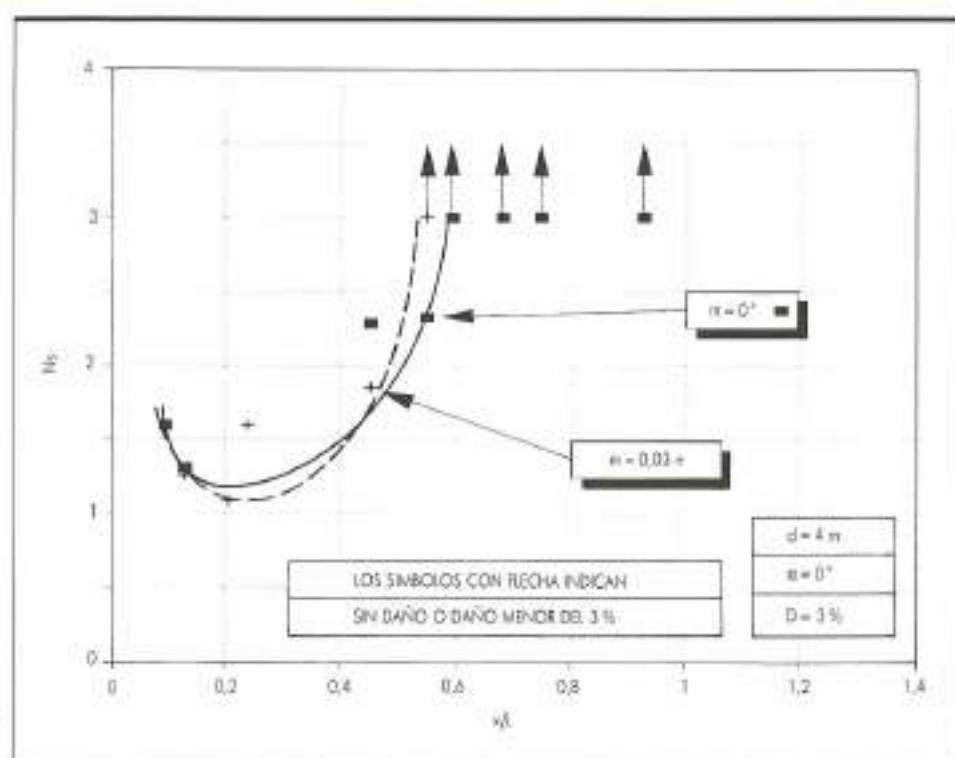


FIGURA 6. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $d = 4,0$ m y diferentes pendientes.

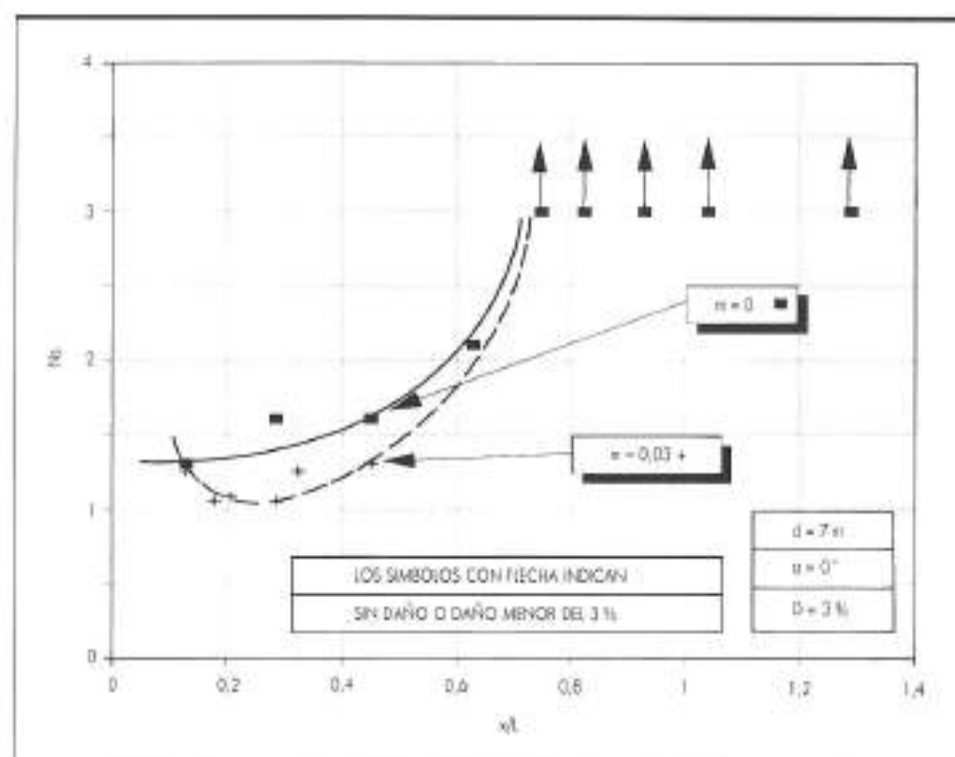


FIGURA 7. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $d = 7,0$ m y diferentes pendientes.

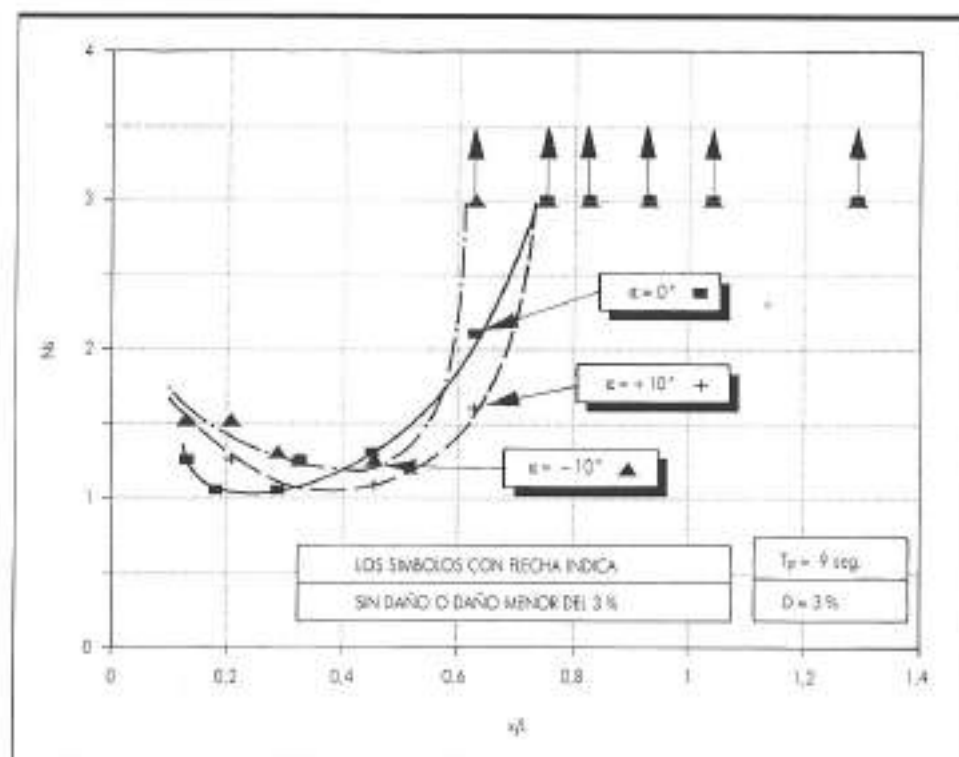


FIGURA 8. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $T_p = 9$ s y diferentes oblicuidades.

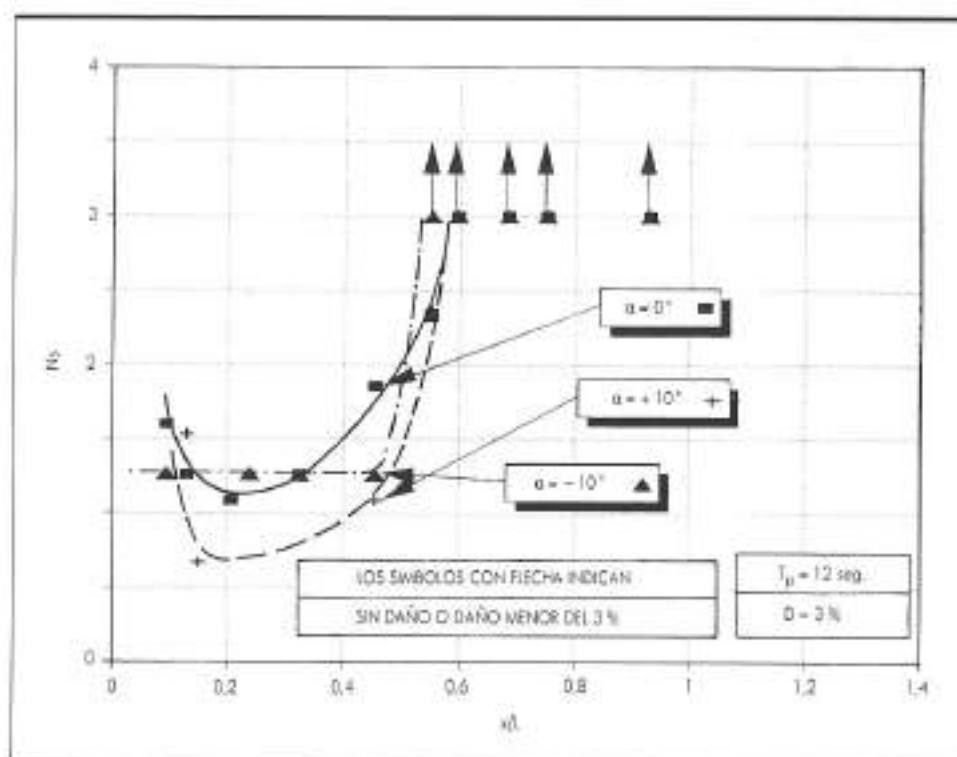


FIGURA 9. Valores de N_s en función de la distancia relativa, para $T_p = 12$ s y diferentes oblicuidades.

duce la unión del flujo descendente del agua que, previamente, ha remontado por la zona del manto próxima al punto de tangencia, con la ola que se difracta rodeando el perímetro circular del morro. La elevada fuerza de arrastre del agua en ese punto, unida al precario equilibrio hacia abajo de algunas unidades del manto, escasamente encajadas de origen, provoca el inicio de las averías. Una vez desplazadas las primeras piezas, la avería se propaga con cierta rapidez debido a la progresiva falta de puntos de contacto de las piezas contiguas. A partir de ahí, se ha observado que el proceso de la avería puede llegar a una cierta ralentización si el flujo descendente citado logra abrir un cauce estable y los elementos caídos contribuyen a la estabilización de las zonas inferiores del perfil.

A partir de $x/L > 0,5$, se observa una clara tendencia a incrementarse la estabilidad cuanto mayor sea el resguardo ante el oleaje (Fig. 8).

En el caso del período mayor, el lado expuesto presenta valores del número de estabilidad menores que en el lado abrigado y que en el ensayo con $\alpha = 0^\circ$ (Fig. 9). Este hecho se puede constatar en las gráficas de las figuras 3, 4 y 5, en las que se han representado los niveles de averías en función de la distancia relativa, para las distintas oblicuidades.

8.2. EVOLUCION DE LAS AVERIAS A LO LARGO DEL ESPIGON

Es un hecho comprobado que la zona del morro de un espigón es la más expuesta a la acción del oleaje y prue-

ba de ello es que es la zona en la que estas obras tienen mayores averías. La incógnita reside en cómo aumenta el grado de estabilidad de los cantos del manto de protección según se recorre longitudinalmente el espigón, desde su extremo hasta la sección de arranque.

En las figuras 10 y 11 se ha relacionado el grado de estabilidad, N_s , de cada sector del espigón en función de su distancia relativa y de las distintas variables.

Estas curvas pueden utilizarse para llevar a cabo un diseño más ajustado de este tipo de estructuras, cuando estén sometidas a incidencia muy oblicua del oleaje, simplemente obteniendo los números de estabilidad a diferentes distancias relativas y para un nivel de daños inferior al 3 %.

Se puede observar que en la zona próxima al morro ($x/L < 0,5$) los valores de N_s en los distintos ensayos, se hallan en el rango $0,6 < N_s < 1,5$. A partir de $x/L > 0,5$, el grado de estabilidad se incrementa hasta valores superiores a $N_s > 1,5$.

9. CONCLUSIONES

1. El diseño del manto de protección de los espigones y diques rompeolas que vayan a estar sometidos a oleajes con incidencia muy oblicua, admite la variación del tamaño de los cantos a lo largo de su perfil longitudinal.
2. La zona del espigón de menor grado de estabilidad corresponde al extremo o morro. Todo el manto de protección del sector de morro, hasta una distancia de

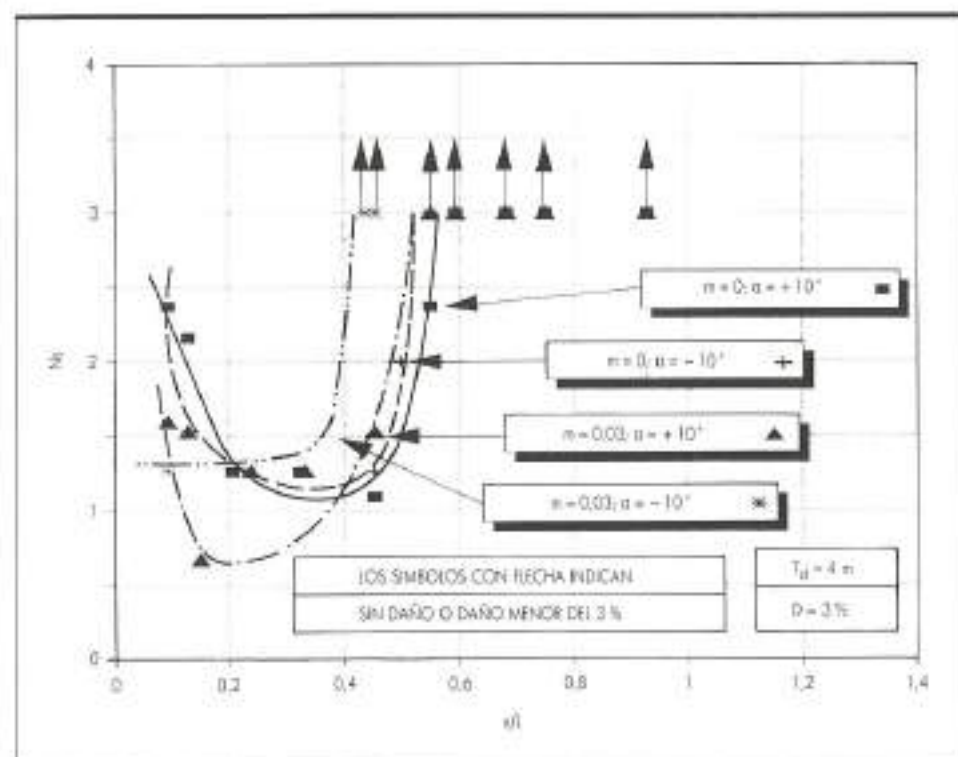


FIGURA 10. Valores de N_s en función de la distancia relativa y de los distintos variables, en el caso $d = 4,0 \text{ m}$.

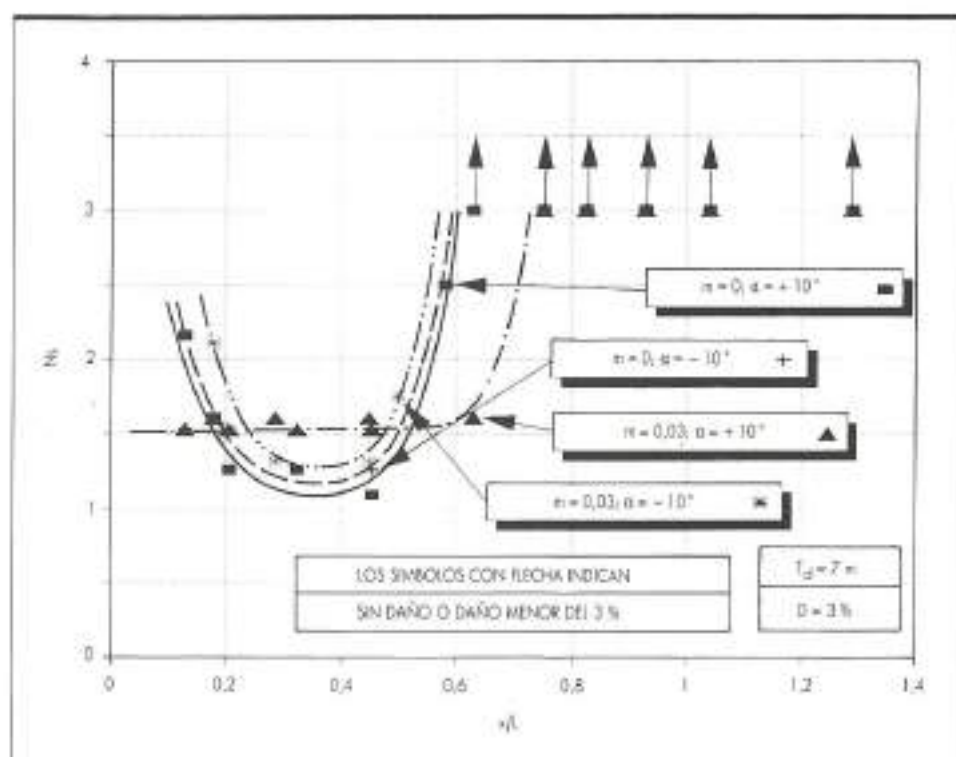


FIGURA 11. Valores de N_s en función de la distancia relativa y de las distintas variables, en el caso $d = 7,0$ m.

$0,5 L$, tiene un grado de estabilidad similar, que puede quedar comprendido en el rango $1,0 < N_s < 1,5$.

3. Los sectores del manto situados a una distancia superior a $0,5 L$ del extremo del espigón, presentan coeficientes de estabilidad, $N_s > 1,5$.

4. La influencia de pequeñas variaciones en la oblicuidad del espigón respecto al oleaje ($\pm 10^\circ$) sobre la estabilidad del manto, es apenas apreciable en la zona del morro. Para zonas situadas a $x/L > 0,5$, se observa una mayor estabilidad en el costado resguardado (-10°).

5. El estudio realizado ha tenido en cuenta las principales variables que influyen en la estabilidad del manto de un espigón sometido a oleaje de incidencia muy oblicua. Sin embargo, el número de ensayos realizados no ha permitido definir la influencia de cada una de ellas en un amplio rango de valores. Esto hace que las gráficas deben utilizarse con el cuidado que indica la fuerte dependencia entre sí de las variables consideradas.

6. Debido al bajo nivel de daños registrado en las zonas distantes del morro, no ha sido posible definir la variación de N_s en toda la longitud del espigón, correspon-

diendo la máxima distancia con valor conocido de dicho número a $x = 0,8 L$. Es recomendable, por tanto, proseguir en el futuro la investigación, en modelo físico, para extender la definición de N_s hasta distancias de dos-tres veces, como mínimo, la longitud de onda, y considerando, además, un mayor número de valores para cada variable, dada la fuerte interdependencia entre éstas observada en los ensayos.

REFERENCIAS

- (1) HUDSON, R. Y. (1975). «Reliability of rubble-mound breakwater stability models; hydraulic model investigation». Miscellaneous Paper H-75-5. Vicksburg, MS : US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- (2) Shore Protection Manual (1984). 4th ed., 2 vol. US Army Engineer Waterways Experiment Station Coastal Engineering Research Center. Washington, DC : US Government Printing Office.
- (3) VIDAL, C. et al. (1991). «Stability of Mound Breakwaters Head and Trunk». Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol. 117, núm. 6. ASCE.