

Ensayos sobre diques arrecife para defensa de costas

JOSÉ MARÍA VALDÉS FERNÁNDEZ DE ALARCÓN (*)
JUAN MANUEL PRADA ESPADA (**)

RESUMEN En este artículo se exponen los resultados de los ensayos realizados en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX en el año 1992. A partir de dichos resultados se analiza la estabilidad de estos diques frente al oleaje, así como su comportamiento hidrodinámico, especialmente su capacidad para amortiguar el oleaje incidente. Se ha analizado de forma importante la influencia de las características del oleaje (alturas de ola y períodos), así como del peso de los elementos de escollera que componen este tipo de diques. Los ensayos son continuación de los realizados en el mismo Centro durante el año 1984.

TESTS ON REEF BREAKWATERS FOR THE DEFENSE OF COASTLINES

ABSTRACT A series of tests was carried out in 1992 on different sections of reef breakwaters in the Harbours and Coasts Laboratory of CEDEX. This work was a continuation of that carried out in 1984 on the same kind of breakwaters. In this article, a summarized exposition is given of the work carried out, and the results obtained, with respect to the structural stability and hydrodynamic behaviour, corresponding to this new test plane.

Palabras clave: Defensa de costas; Diques; Arrecifes.

1. INTRODUCCIÓN

Los diques arrecife pueden ser una solución ventajosa, frente a los diques convencionales, en aquellos casos en los que no se requiera un abrigo total frente al oleaje incidente, en una zona costera determinada. Algunas aplicaciones de estos diques pueden ser la protección de playas y áreas recreativas, protección de canales de entrada y obras marítimas, o la modificación y el ajuste del transporte litoral.

Estos diques se caracterizan fundamentalmente por su baja cota de coronación al objeto de permitir el paso de una cierta cantidad de la energía del oleaje incidente. Están constituidos por una acumulación de elementos, generalmente de escollera, que conforman un cierto perfil tipo en el que se prescinde de núcleo y de cualquier tipo de capa intermedia.

De la energía del oleaje que incide sobre un dique arrecife, una parte se refleja, otra parte se transmite sobre él y a través de los huecos existentes en su estructura, y el resto se disipa debido a la turbulencia, a la fricción del oleaje y a la rotura del mismo sobre el dique.

Sus características geométricas no permiten la aplicación de las fórmulas tradicionales para el cálculo del peso de los elementos de protección sometidos a la acción del oleaje (Hudson, Iribarren, Van der Meer). Existen trabajos realizados por diversos autores¹, en los que se propone el estudio de

los diques arrecife mediante una serie de parámetros, tales como el número de estabilidad espectral (N_s), el factor de reducción de altura de coronación (h/h'), altura de coronación relativa (h/d).

Debido a las estrictas condiciones de funcionamiento de estas obras, su utilización está limitada a zonas de carrera de marea baja y profundidades reducidas e intermedias.

En el CEPYC se han realizado diversos ensayos en modelo físico sobre este tipo de diques, por encargo de la antigua Dirección General de Puertos y Costas, con la pretensión de aportar más información sobre su comportamiento estructural e hidrodinámico ya que su uso está cada vez más extendido.

En 1984 se llevó a cabo en el Laboratorio un estudio sobre el comportamiento de este tipo de diques². Los ensayos se hicieron para dos pendientes del fondo diferentes ($m = 1$ y 5%) y una profundidad única al pie de sección ($d = 5,00$ m). Con estas condiciones se ensayó una sección tipo de forma trapezoidal (anchura de coronación = $5,50$ m) y otra de forma triangular, constituidas ambas por elementos de escollera. Con cada sección tipo se ensayaron varios pesos de escollera y tres oleajes de diferente periodo, reproduciéndose con cada uno de ellos un temporal con alturas de ola significativas comprendidas entre $0,50$ m y la altura con la que se produce la rotura de ola por efecto de fondo, antes de que el frente de onda alcance la sección, (entre 3 y $3,50$ m).

A raíz de que los resultados obtenidos en el estudio de 1984, pusieron de manifiesto la influencia de la pendiente del fondo sobre el comportamiento estructural e hidrodiná-

[*] Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. División de Estructuras Marítimas. Sector de Experimentación Hidráulica. Centro de Estudios de Puertos y Costas. CEDEX (MOPTMA).

[**] Ingeniero Técnico en Construcciones Civiles. Analista Funcional de la División de Estructuras Marítimas. Sector de Experimentación Hidráulica. Centro de Estudios de Puertos y Costas. CEDEX (MOPTMA).

¹ Ver bibliografía.

² "Ensayos sobre diques arrecife para defensa de costas", R. Estu-
tia, CEPYC, 1984.

mico de este tipo de obras, se estimó conveniente la realización de nuevos ensayos para una pendiente intermedia, adoptándose $m = 3,33$ %. Durante el desarrollo de los mismos se realizaron medidas de reflexión y transmisión de oleaje, llevándose a cabo también un seguimiento del comportamiento de la estabilidad de los elementos de escollera. Las conclusiones técnicas obtenidas tras el estudio de estos nuevos ensayos constituyen el objeto del presente artículo.

2. CARACTERÍSTICAS

2.1. SECCIONES

Las características geométricas de la sección trapezoidal tipo ensayada, figura 1, fueron las siguientes:

Anchura de coronación	$B = 5,50$ m
Cota de coronación	$C = 0,50$ m
Taludes (interior y exterior)	1/1
Profundidad a pie de dique	5 m
Pendiente del fondo	3,3%

Los pesos de los elementos de escollera, así como la distribución de los mismos en cada una de las secciones, A, A1, A2 y A3, se muestra en la tabla 1.

SECC	5%	15%	30%	30%	15%	5%
A	0.8-2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.2
A1	0.5-1.5	1.5-2.0	2.0-2.5	2.5-3.0	3.0-3.5	3.5-4.5
A2	0.2-0.5	0.5-0.8	0.8-1.0	1.0-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8
A3	0.5-1.0	1.0-1.2	1.2-1.5	1.5-1.8	1.8-2.0	2.0-2.5

TABLA 1. Distribución de pesos de escollera (Tn).

Con estas distribuciones, los pesos mínimo, medio y máximo de la escollera que constituyeron cada sección fueron los de la tabla 2.

2.2. OLEAJES DE ENSAYO

Los ensayos se llevaron a cabo con tres oleajes de tipo irregular, con tres periodos de pico diferentes, comprendidos en

SECCIÓN	P_{min} (Tn)	P_{med} (Tn)	$P_{máx}$ (Tn)
A	0.80	4.00	7.20
A1	0.50	2.50	4.50
A2	0.20	1.00	1.80
A3	0.50	1.50	2.50

TABLA 2.

un intervalo suficientemente representativo y cuyas características espectrales en prototipo (periodo de pico T_p , parámetro espectral γ , L_w longitud de onda en aguas profundas y L_p longitud de onda a pie de dique) fueron las siguientes:

OLEAJE	T_p	γ	L_w	L_p
1	12.00	3.3	224.64	129.75
2	8.50	3.3	112.71	85.77
3	5.00	3.3	39.00	38.16

TABLA 3.

Con cada uno de los oleajes definidos se creó un temporal de ensayo, con una altura significativa inicial de unos 0,50 m (en prototipo), que fue aumentándose en sucesivas etapas hasta alcanzar una altura significativa para la cual se producían roturas antes de alcanzar la sección (entre 3,00 y 3,50 m). Se consideró la dirección de oleaje de incidencia normal a la sección tipo, lo cual representa la situación más desfavorable.

Antes de construir las secciones, se analizó la variación producida por la disminución de la profundidad ("shoaling") entre las alturas de ola de los frentes generados por la paleta y los que alcanzan la zona de situación del modelo, para ello se dispusieron dos sondas de medida. En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos para cada periodo, y la disposición de las sondas de medida.

2.3. DISPOSICIÓN DEL MODELO

Para la realización de los ensayos se adoptó la escala 1/20, la misma que se utilizó en los ensayos llevados a cabo en

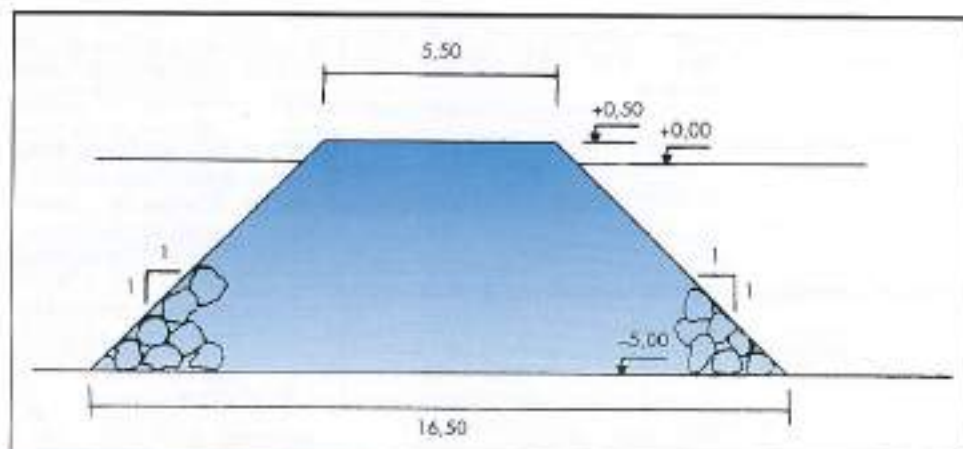


FIGURA 1. Sección tipo.

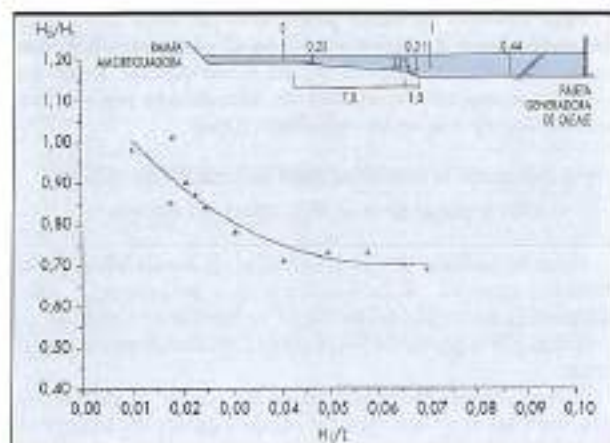


FIGURA 2. Calibración de alturas de ola. Puntos 1 y 2.

1984, planteándose la equivalencia modelo-prototipo mediante la ley de semejanza de Froude. De acuerdo con esta escala, se seleccionaron los diferentes pesos de escollera para la construcción de las secciones en el modelo, teniendo en cuenta las diferencias de densidades de los materiales y del agua entre modelo y prototipo. Mediante el número de Reynolds se analizó la importancia de los efectos de escala debidos a la viscosidad del agua, comprobándose una influencia despreciable en los resultados obtenidos.

En la figura 3 se muestra la disposición del modelo en el canal de ensayos, pudiéndose observar la situación de la sección y de las sondas de medida del oleaje. Para la medida de los oleajes incidente y reflejado se utilizó el método de Goda y Suzuki (Proc. of Coastal Engineering Conference, 1976), colocando las sondas en el punto 0 a la profundidad $d = 13.60$ m en prototipo. Este método permite discretizar la altura de ola incidente de la reflejada. El oleaje transmitido se midió en los puntos 1 y 2 situados al abrigo de la sección, tal como se observa en la misma figura.

Las secciones se construyeron ocupando toda la anchura del canal (1 m) por lo que la longitud de dique arrecife equivalente en prototipo fue de 20 metros. El peso específico de la piedra utilizada en el modelo fue de $(\gamma_a) m = 2.64$ gr/cm³. Para mantener la relación de densidades entre modelo y prototipo igual a 1/1.025 se adoptó para la escollera en prototipo $(\gamma_a)p = 2.70$ Tn/m³.

Para construir cada sección, se tomaron proporciones de escollera en volumen de los distintos pesos disponibles y,

una vez mezcladas entre sí, se colocaron de forma totalmente aleatoria, vertiendo el material hasta conseguir el perfil tipo definido. Con objeto de poder analizar más detalladamente la estabilidad, se pintaron de diferente color los elementos de distintos pesos en cada sección ensayada. Ello permitiría conocer el peso de los elementos desplazados de su posición inicial mediante la observación directa de los ensayos.

3. METODOLOGÍA DE LOS ENSAYOS

Las medidas de oleaje se realizaron mediante sondas que permiten obtener los parámetros característicos del oleaje en unidades de prototipo: H_{10} , H_{rms} , T_{10} , T_{rms} , referidos al punto de medida.

Las sondas se colocaron tal como se observa en la figura 3, antes del comienzo de la rampa del fondo, a una distancia de unos 8 metros de la sección, válida para aplicación del método de Goda en los tres oleajes considerados.

Mediante este dispositivo se obtuvieron los siguientes datos:

- H_i = altura de ola significativa incidente.
- H_r = altura de ola reflejada.
- K_r = coeficiente de reflexión = H_r/H_i .

La medida del oleaje transmitido se realizó en dos puntos situados detrás de la sección, para analizar la posible variación de la transmisión de oleaje en función de la posición del punto de medida (figura 3).

Mediante las sondas situadas en los puntos 1 y 2 de la figura 10 se obtuvieron los siguientes datos:

- H_{t1} = altura de ola transmitida en el punto 1.
- H_{t2} = altura de ola transmitida en el punto 2.
- K_{t1} = coeficiente de transmisión en el punto 1 = H_{t1}/H_i .
- K_{t2} = coeficiente de transmisión en el punto 2 = H_{t2}/H_i .

La eficacia de este tipo de diques, cuyo objetivo es amortiguar la energía del oleaje incidente, puede valorarse en base al coeficiente de transmisión siendo éste por tanto, el parámetro fundamental a tratar en el presente estudio.

El seguimiento de la estabilidad de las secciones se realizó principalmente mediante perfiles transversales tomados durante el transcurso de los ensayos. Estos perfiles se midieron antes de comenzar cada ensayo y después de cada etapa del temporal, de diferente altura de ola significativa.

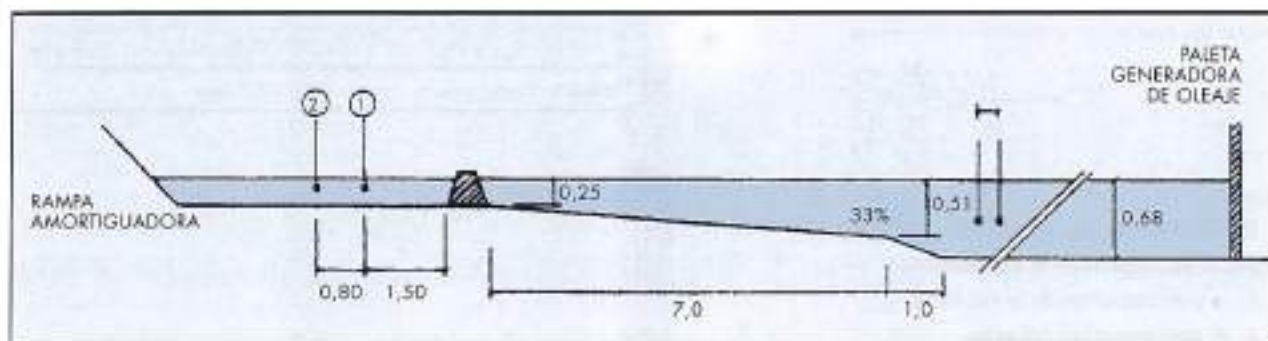


FIGURA 3. Disposición general del modelo.

la separación entre perfiles fue de 5 m, y en cada perfil la distancia entre puntas de sondeaje fue de 1 m, ambas medidas referidas al prototipo.

A partir de los tres perfiles transversales tomados en cada caso, se obtuvo el perfil medio de la sección. Para el análisis de averías se compararon los perfiles medios obtenidos durante el ensayo de cada sección, con el perfil medio inicial obtenido antes del ensayo.

Además de este tipo de análisis, se llevó a cabo un seguimiento visual de la estabilidad, contabilizando el número de elementos de escollera desplazados hacia el pie del dique, distinguiéndose se peso según el color.

Para reproducir las condiciones ante las que se encontraría sometida la estructura durante un temporal real, en el modelo no se repararon los daños producidos en cada etapa de diferente altura de ola significativa. De esta manera, el estado final de las secciones al término de cada etapa del temporal ensayo, corresponde al estado inicial al comienzo de la siguiente etapa con altura de ola significativa superior.

Al finalizar cada uno de los ensayos se hicieron tomas de datos de oleaje para una o varias alturas de ola, manteniendo, en cada caso, el estado alcanzando por la sección tras el temporal. El objeto de estas medidas fue comprobar las posibles variaciones en el comportamiento hidrodinámico de las secciones, comparando los resultados medidos en el transcurso del temporal con los obtenidos mediante las mismas sollicitaciones pero sobre las secciones deformadas en el transcurso de aquél.

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados obtenidos se recogen en las tablas 4 a 15 en las que se incluyen los valores de los siguientes parámetros:

H_i = altura de ola significativa incidente.

H_r = altura de ola significativa reflejada.

H_{t1} = altura de ola significativa transmitida en el punto 1.

H_{t2} = altura de ola significativa transmitida en el punto 2.

H/L = peralte del oleaje incidente.

K_r = coeficiente de reflexión.

K_{t1} = coeficiente de transmisión en el punto 1.

K_{t2} = coeficiente de transmisión en el punto 2.

H_{t2}/H_{t1} = relación entre alturas de ola transmitidas.

En estudios llevados a cabo por Ahrens sobre este tipo de diques (Characteristics of Reef-Breakwaters, John P. Ahrens, CERC, 1987), el autor propone analizar la estabilidad mediante el número de estabilidad espectral N_s^* , obtenido a partir del número de estabilidad de hudson:

$$N_s^* = \frac{(H_s L_p)^{1/3}}{\left(\frac{P_{50}}{\gamma_w}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s} - 1\right)}$$

donde:

H_s = altura de ola significativa en la sección.

P_{50} = peso medio de la escollera.

γ_w = peso específico de la escollera.

γ_s = peso específico del agua.

L_p = longitud de onda para la profundidad a pie de dique.

Para analizar los daños producidos por unas determinadas condiciones de oleaje se define el parámetro h/h' , llamado factor de reducción de altura de coronación. Dicho parámetro representa la pérdida de cota sufrida por el dique arrecife debido a la acción del oleaje, donde

h = altura de la sección al final de cada H_s de ensayo.

h' = altura inicial de la sección antes del ensayo.

Para el análisis de los resultados de estabilidad de los presente ensayos, se ha adoptado esta metodología, obteniéndose la variación del factor de reducción de altura de coronación h/h' a partir de los perfiles tomados durante los ensayos.

Los resultados se presentan en las tablas 16 a 19 en las que para los tres periodos del oleaje figuran los valores de N_s^* y del factor h/h' .

H_i	H_r	H_{t1}	H_{t2}	H/L	K_r	K_{t1}	K_{t2}	H_{t2}/H_{t1}
0.55	0.25	0.22	0.23	0.00424	0.455	0.400	0.418	1.05
1.00	0.43	0.41	0.40	0.00771	0.430	0.410	0.400	0.98
1.49	0.60	0.66	0.59	0.01148	0.403	0.443	0.396	0.89
1.99	0.75	0.88	0.75	0.01534	0.377	0.442	0.377	0.85
2.01	0.75	0.89	0.75	0.01549	0.373	0.443	0.373	0.84
2.48	0.87	1.19	1.05	0.01911	0.351	0.480	0.423	0.88
2.93	0.96	1.44	1.23	0.02258	0.328	0.491	0.420	0.85
3.50	1.03	1.62	1.40	0.02697	0.290	0.463	0.400	0.86

TABLA 4. Diques arrecife. Sección A. $T_p = 12$ seg.

H_i	H_r	H_{t1}	H_{t2}	H/L	K_r	K_{t1}	K_{t2}	H_{t2}/H_{t1}
0.59	0.26	0.21	0.19	0.00688	0.441	0.356	0.322	0.90
0.92	0.39	0.29	0.27	0.01073	0.424	0.315	0.293	0.93
1.60	0.62	0.52	0.47	0.01865	0.388	0.325	0.294	0.90
2.01	0.74	0.68	0.63	0.02343	0.368	0.338	0.313	0.93
2.66	0.89	0.97	0.89	0.03101	0.335	0.365	0.335	0.92
2.67	0.90	0.94	0.88	0.03113	0.337	0.352	0.330	0.94
3.19	0.95	1.08	0.97	0.03719	0.298	0.339	0.304	0.90
3.25	0.99	1.15	1.03	0.03789	0.305	0.354	0.317	0.90
3.60	1.03	1.29	1.13	0.04197	0.286	0.358	0.314	0.88

TABLA 5. Diques arrecife. Sección A. $T_p = 8,5$ seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.37	0.13	0.12	0.11	0.00970	0.351	0.324	0.297	0.92
0.42	0.14	0.13	0.12	0.01101	0.333	0.310	0.286	0.92
0.53	0.17	0.14	0.14	0.01389	0.321	0.264	0.264	1.00
1.06	0.3	0.24	0.23	0.02778	0.283	0.226	0.217	0.96
1.42	0.42	0.37	0.33	0.03721	0.296	0.261	0.232	0.89
1.52	0.42	0.37	0.34	0.03983	0.276	0.243	0.224	0.92
1.7	0.49	0.43	0.4	0.04455	0.282	0.253	0.235	0.93
1.72	0.49	0.45	0.4	0.04507	0.285	0.262	0.233	0.89
1.9	0.57	0.52	0.46	0.04979	0.300	0.274	0.242	0.88
1.94	0.56	0.53	0.47	0.05084	0.289	0.273	0.242	0.89
2.16	0.62	0.6	0.54	0.05660	0.292	0.278	0.250	0.90
2.35	0.69	0.65	0.61	0.06158	0.294	0.277	0.260	0.94
2.41	0.66	0.67	0.63	0.06316	0.274	0.278	0.261	0.94
2.48	0.69	0.67	0.62	0.06499	0.278	0.270	0.250	0.93
2.68	0.78	0.75	0.69	0.07023	0.291	0.280	0.057	0.92
2.77	0.32	0.5	0.75	0.07259	0.292	0.289	0.271	0.94
2.78	0.31	0.11	0.74	0.07285	0.291	0.291	0.266	0.91

TABLA 6. Diques arrecife. Sección A. Tp = 5 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.55	0.23	0.21	0.20	0.00424	0.418	0.382	0.364	0.95
1.01	0.41	0.40	0.38	0.00778	0.406	0.396	0.376	0.95
1.50	0.58	0.63	0.58	0.01156	0.387	0.420	0.387	0.92
2.03	0.73	0.87	0.80	0.01565	0.360	0.429	0.394	0.92
2.41	0.82	1.24	1.06	0.01857	0.340	0.515	0.460	0.85
2.53	0.82	1.34	1.08	0.01950	0.024	0.530	0.427	0.81
2.87	0.91	1.31	1.23	0.02212	0.317	0.526	0.429	0.81
3.04	0.90	1.59	1.23	0.02343	0.296	0.523	0.405	0.77
3.38	0.94	1.57	1.29	0.02605	0.278	0.464	0.382	0.82
3.41	0.95	1.59	1.27	0.02628	0.279	0.466	0.372	0.80

TABLA 7. Diques arrecife. Sección A1. Tp = 12 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.64	0.27	0.22	0.21	0.00745	0.422	0.344	0.328	0.95
0.99	0.40	0.32	0.30	0.01154	0.404	0.323	0.303	0.94
1.64	0.61	0.54	0.54	0.01912	0.372	0.329	0.329	1.00
2.05	0.72	0.73	0.70	0.02390	0.351	0.356	0.341	0.96
2.53	0.80	1.02	0.86	0.02950	0.316	0.403	0.340	0.84
2.58	0.84	1.02	0.90	0.03008	0.326	0.395	0.349	0.88
3.03	0.90	1.26	1.04	0.03533	0.297	0.416	0.343	0.83
3.62	1.00	1.47	1.19	0.04221	0.276	0.406	0.329	0.81

TABLA 8. Diques arrecife. Sección A1. Tp = 8.5 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.59	0.15	0.16	0.15	0.01546	0.254	0.271	0.254	0.94
1.09	0.27	0.27	0.24	0.02856	0.248	0.248	0.220	0.89
1.43	0.37	0.38	0.32	0.03747	0.259	0.265	0.224	0.84
1.90	0.51	0.53	0.47	0.04979	0.268	0.279	0.247	0.89
2.05	0.54	0.56	0.52	0.05372	0.263	0.273	0.254	0.93
2.19	0.59	0.59	0.59	0.05739	0.269	0.269	0.269	1.00
2.34	0.62	0.65	0.61	0.06132	0.265	0.278	0.261	0.94
2.44	0.63	0.65	0.64	0.06394	0.258	0.266	0.262	0.98
2.57	0.70	0.76	0.72	0.06735	0.272	0.296	0.280	0.95

TABLA 9. Diques arrecife. Sección A1. Tp = 5 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.56	0.25	0.19	0.21	0.00402	0.446	0.339	0.375	1.11
1.00	0.44	0.34	0.35	0.00771	0.440	0.340	0.350	1.03
1.51	0.62	0.61	0.57	0.01164	0.411	0.404	0.377	0.93
1.56	0.61	0.60	0.58	0.01202	0.391	0.385	0.372	0.97
1.96	0.74	0.90	0.80	0.01511	0.378	0.459	0.403	0.89
2.65	0.81	1.33	1.10	0.02042	0.306	0.502	0.415	0.83
2.88	0.81	1.51	1.23	0.02220	0.281	0.524	0.427	0.81
3.11	0.80	1.55	1.28	0.02397	0.257	0.498	0.412	0.83

TABLA 10. Diques arrecife. Sección A2. Tp = 12 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.50	0.21	0.16	0.15	0.00583	0.420	0.320	0.300	0.94
0.96	0.37	0.29	0.25	0.01119	0.385	0.302	0.260	0.86
1.42	0.54	0.45	0.44	0.01656	0.380	0.317	0.310	0.98
1.51	0.56	0.47	0.46	0.01761	0.371	0.311	0.305	0.98
2.05	0.62	0.70	0.66	0.02390	0.302	0.341	0.322	0.94
2.41	0.73	0.91	0.80	0.02810	0.303	0.378	0.322	0.88
2.55	0.76	0.98	0.84	0.02973	0.298	0.384	0.329	0.86
3.06	0.82	1.30	1.02	0.03568	0.268	0.425	0.333	0.78

TABLA 11. Diques arrecife. Sección A2. Tp = 8.5 seg.

H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H ₅ /L	K ₁	K ₂	K ₃	H ₅ /H ₁
0.55	0.18	0.13	0.12	0.01441	0.327	0.236	0.218	0.92
1.12	0.32	0.23	0.20	0.02935	0.286	0.205	0.179	0.87
1.43	0.41	0.29	0.26	0.03747	0.287	0.203	0.182	0.90
1.91	0.53	0.42	0.42	0.05005	0.277	0.220	0.220	1.00
2.30	0.60	0.59	0.59	0.06027	0.261	0.257	0.257	1.00
2.35	0.57	0.59	0.62	0.06158	0.243	0.251	0.284	1.05

TABLA 12. Diques arrecife. Sección A2. Tp = 5 seg.

H_i	H_t	H_o	H_{tr}	H_o/L	K_t	K_i	K_o	H_o/H_i
0.56	0.25	0.19	0.20	0.00432	0.445	0.339	0.357	1.05
1.10	0.44	0.37	0.36	0.00848	0.400	0.336	0.327	0.97
1.44	0.58	0.63	0.54	0.01110	0.403	0.438	0.375	0.86
1.96	0.76	0.85	0.75	0.01511	0.385	0.434	0.383	0.88
2.60	0.87	1.14	0.96	0.02004	0.335	0.438	0.369	0.84
3.00	0.92	1.39	1.18	0.02312	0.307	0.463	0.393	0.85
3.32	0.93	1.60	1.34	0.02559	0.280	0.482	0.404	0.84
3.49	0.95	1.66	1.37	0.02690	0.272	0.476	0.393	0.83

TABLA 13. Diques arrecife. Sección A3. $T_p = 12$ seg.

H_i	H_t	H_o	H_{tr}	H_o/L	K_t	K_i	K_o	H_o/H_i
0.50	0.21	0.16	0.15	0.00533	0.420	0.320	0.300	0.94
0.92	0.36	0.26	0.23	0.01073	0.391	0.283	0.250	0.88
1.51	0.56	0.46	0.43	0.01761	0.371	0.305	0.285	0.93
1.94	0.67	0.66	0.63	0.02262	0.345	0.340	0.325	0.95
2.50	0.83	1.00	0.87	0.02915	0.332	0.400	0.348	0.87
3.06	0.92	1.27	1.05	0.03568	0.301	0.415	0.343	0.83
3.54	1.01	1.40	1.12	0.04127	0.285	0.395	0.316	0.80

TABLA 14. Diques arrecife. Sección A3. $T_p = 8.5$ seg.

H_i	H_t	H_o	H_{tr}	H_o/L	K_t	K_i	K_o	H_o/H_i
0.59	0.20	0.14	0.13	0.01546	0.339	0.237	0.220	0.93
1.10	0.34	0.23	0.21	0.02883	0.309	0.209	0.191	0.91
1.46	0.44	0.32	0.29	0.03878	0.297	0.216	0.196	0.91
1.82	0.52	0.40	0.40	0.04769	0.286	0.220	0.220	1.00
1.93	0.55	0.43	0.42	0.05058	0.285	0.223	0.218	0.92
2.39	0.66	0.58	0.59	0.05263	0.276	0.240	0.247	1.02
2.41	0.68	0.61	0.61	0.06316	0.282	0.253	0.253	1.00
2.66	0.73	0.73	0.73	0.06971	0.274	0.274	0.274	1.00

TABLA 15. Diques arrecife. Sección A3. $T_p = 5$ seg.

H_i (m)	$T_p = 12$ s		$T_p = 8.5$ s		$T_p = 5$ s	
	N_t^*	h/h'	N_t^*	h/h	N_t^*	h/h
1.00	2.72	1.000	2.37	1.000	1.81	1.000
1.50	3.56	0.955	3.10	0.998	2.37	0.984
2.00	4.31	0.964	3.76	—	2.87	—
2.50	5.01	0.944	4.36	0.961	3.33	—
3.00	5.65	0.933	4.92	0.943	3.76	0.969
3.50	6.26	0.921	5.46	0.973	4.17	—

TABLA 16.

H_i (m)	$T_p = 12$ s		$T_p = 8.5$ s		$T_p = 5$ s	
	N_t^*	h/h'	N_t^*	h/h	N_t^*	h/h
1.00	3.18	1.000	2.77	1.000	2.11	1.000
1.50	4.16	1.000	3.63	1.000	2.77	1.000
2.00	5.05	0.981	4.40	1.000	3.36	0.998
2.50	5.85	0.949	5.10	0.983	3.89	0.989
3.00	6.61	0.951	5.76	0.987	4.40	—
3.50	7.33	0.945	6.38	0.961	4.87	—

TABLA 17.

H_i (m)	$T_p = 12$ s		$T_p = 8.5$ s		$T_p = 5$ s	
	N_t^*	h/h'	N_t^*	h/h	N_t^*	h/h
1.00	4.31	1.000	3.76	1.000	2.87	1.000
1.50	5.65	0.916	4.92	0.985	3.76	1.000
2.00	6.85	0.899	5.97	0.972	4.55	0.958
2.50	7.95	0.858	6.92	0.957	5.28	0.953
3.00	8.97	0.828	7.82	0.925	5.97	—

TABLA 18.

H_i (m)	$T_p = 12$ s		$T_p = 8.5$ s		$T_p = 5$ s	
	N_t^*	h/h'	N_t^*	h/h	N_t^*	h/h
1.00	3.77	1.000	3.28	1.000	2.51	1.000
1.50	4.94	1.000	4.30	1.000	3.28	0.985
2.00	5.98	0.962	5.21	0.996	3.98	0.976
2.50	6.94	0.962	6.05	0.996	4.62	0.956
3.00	7.84	0.894	6.83	0.981	5.21	0.978
3.50	8.69	0.874	7.57	0.978	5.78	—

TABLA 19.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO

Los valores del coeficiente de transmisión K_{t1} en el punto de medida 1, para cada una de las secciones, se muestran en el gráfico de la figura 4.

Como puede observarse todas las secciones presentan valores similares del coeficiente de transmisión con cada uno de los oleajes de ensayo. Para las alturas de ola bajas, para las que la transmisión del oleaje se produce principalmente por porosidad, puede haber alguna diferencia debida a este factor. A mayor peso de escollera, es mayor el volumen de huecos y por tanto se produce una mayor transmisión de la energía del oleaje a través de los huecos de la estructura. Este fenómeno es apreciable entre las secciones A (mayor peso) y A2 (menor peso). Sin embargo para las alturas de ola mayores se invierte la tendencia, pues la trans-

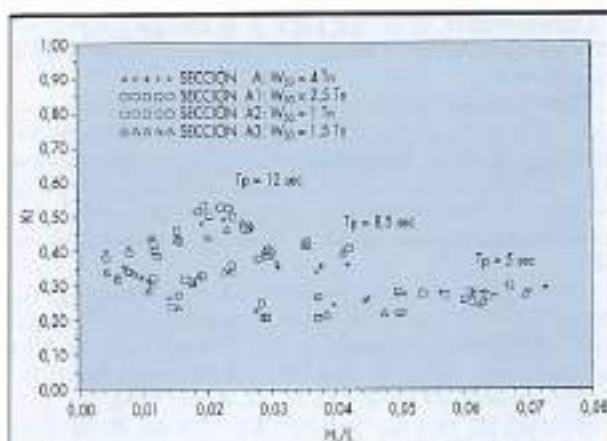


FIGURA 4. Coeficientes de transmisión en el punto 1.

misión del oleaje se produce principalmente por rebase, con lo que las secciones que han sufrido mayor pérdida de cota durante el temporal (sección A2, menor peso de la escollera) presentan un aumento algo más pronunciado del coeficiente de transmisión.

Por otra parte, se observa la clara influencia del periodo del oleaje, y a la vista de los resultados puede decirse que este tipo de diques es más efectivo (menor transmisión) cuanto menor es el periodo de pico del oleaje incidente.

Para determinar la influencia que tiene la distancia del punto de medida a la sección a la hora de evaluar el coeficiente de transmisión, se han dibujado en la figura 5, los resultados del coeficiente de transmisión obtenidos en los puntos de medida 1 y 2. Cada periodo viene representado por parejas de curvas correspondiente cada una de ellas a un punto de medida. En todos los casos en el punto de medida 1 el coeficiente de transmisión presenta valores superiores a los obtenidos en el punto 2. La diferencia es mayor cuanto mayor es el periodo del oleaje. Para $T_p = 12$ seg el coeficiente de transmisión es del orden de un 20% mayor en el punto 1 para las alturas de ola mayores, mientras que para el periodo $T_p = 5$ seg no se aprecian diferencias entre ambos puntos de medida.

Tal como se ha comprobado, el oleaje transmitido, en su propagación, puede verse sujeto a variaciones más o menos acusadas en función del periodo y de la altura de ola incidentes, influyéndole además de la configuración del fondo existente entre el dique arrecife y la playa o zona costera a proteger. Por ello, parece conveniente en este tipo de ensayos, además de especificar el punto de medida al que se refiere la transmisión del oleaje, reproducir correctamente la geometría del fondo de dicha zona.

Para analizar la reflexión del oleaje, en la figura 6 se han representado los valores del coeficiente de reflexión obtenidos a lo largo de todos los ensayos. El coeficiente de reflexión K_r muestra una tendencia decreciente al aumentar el peralte del oleaje, a partir del valor 0.04 el coeficiente K_r tiende a estabilizarse en torno a un valor cercano a 0.25.

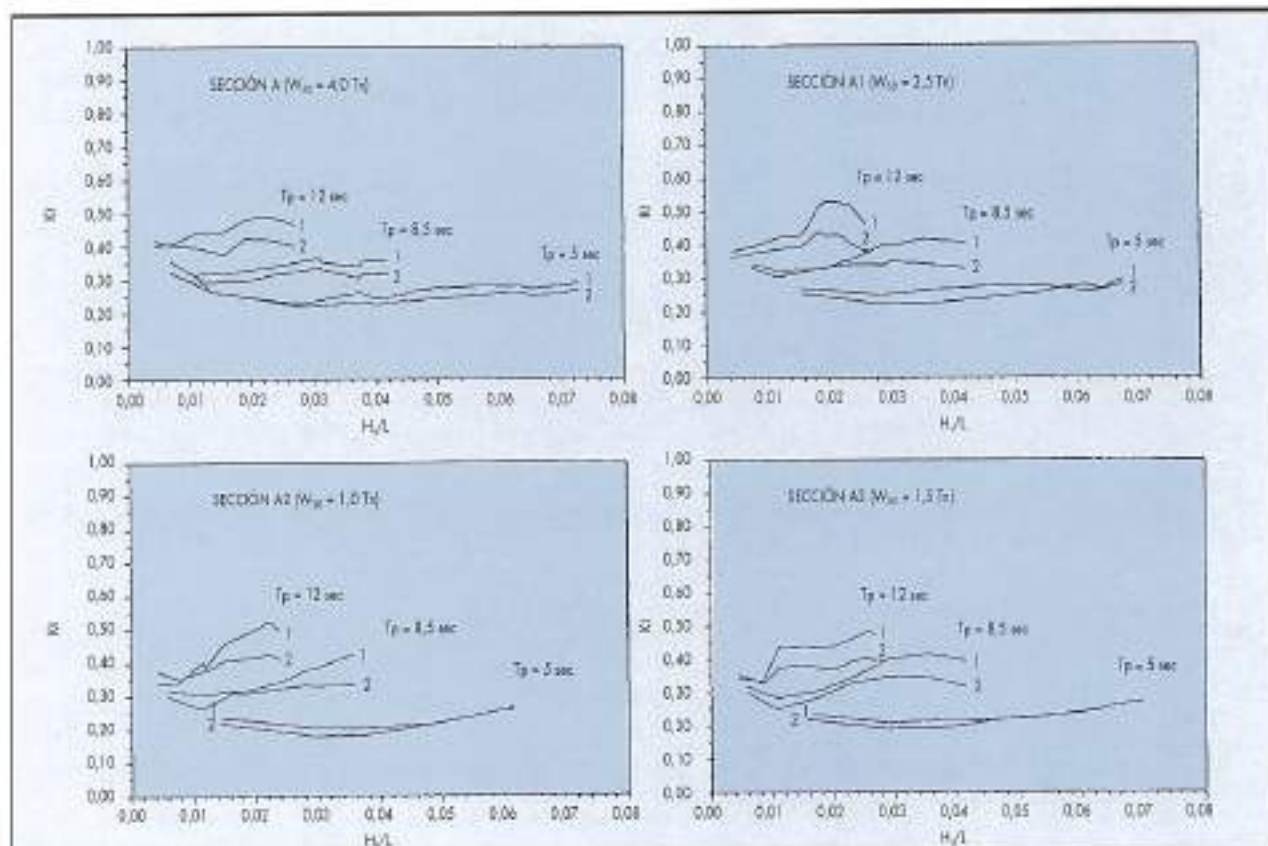


FIGURA 5. Coeficiente de transmisión en los puntos 1 y 2.

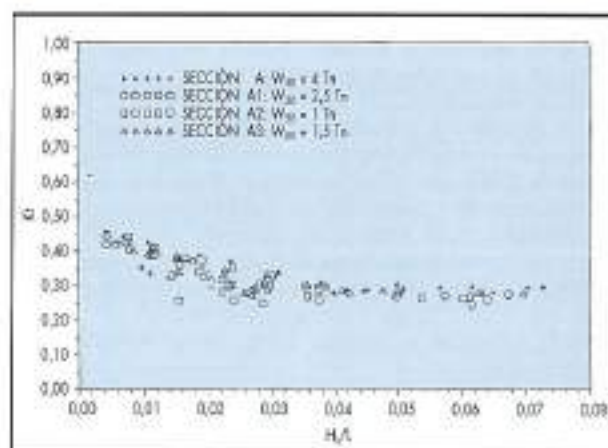


FIGURA 6. Coeficiente de reflexión.

Además de una atenuación de la altura de ola, el dique arrecife produce una modificación del periodo del oleaje incidente. Para alturas de ola bajas, en las que la transmisión se produce principalmente por porosidad, el periodo es similar al incidente. Para alturas de ola en las que la transmisión se produce por rebase, los impactos de éstos sobre la masa de agua de la zona abrigada originan ondas de periodo más corto que el incidente. Finalmente, para las alturas de

ola más elevadas, en las que parte de la energía oleaje se disipa por rotura sobre el dique, el periodo tiende a ser similar al incidente.

Este fenómeno puede apreciarse claramente en la figura 7. En ella se ha representado en abscisas la altura de ola incidente, y en ordenadas la relación entre los periodos transmitido e incidente. Como puede observarse, la variación es más acusada para el periodo de 12 segundos, llegando en algún caso a reducirse el periodo casi hasta en un 50%.

Con objeto de analizar la influencia de la pendiente del fondo en la transmisión de oleaje, se han tratado de comparar los resultados obtenidos en los recientes ensayos para una pendiente del fondo de 3,3%, con los resultados de los ensayos realizados en el CEPYC en el año 1984, con pendientes del 1% para las secciones A y A1 y del 5% para las secciones A2 y A3.

En las figuras 8 y 9, se han representado los coeficientes de transmisión obtenidos en dichos casos, en función del peralte del oleaje incidente. Las diferencias en el coeficiente de transmisión obtenidas para las pendientes del 5% y del 3,3% son apreciables, observándose que para la pendiente del 5% se transmite mayor cantidad de energía tanto para el periodo de 8,5 seg como para el de 12 seg. Sin embargo, entre las pendientes del 1% y del 3,3% es difícil apreciar una tendencia clara, pudiéndose deber a la existencia de la discordancia existente entre las condiciones de ensayo de ambos estudios (distancias distintas a la sección de los puntos de medida del oleaje transmitido, diferentes condiciones de contorno, diferente metodología).

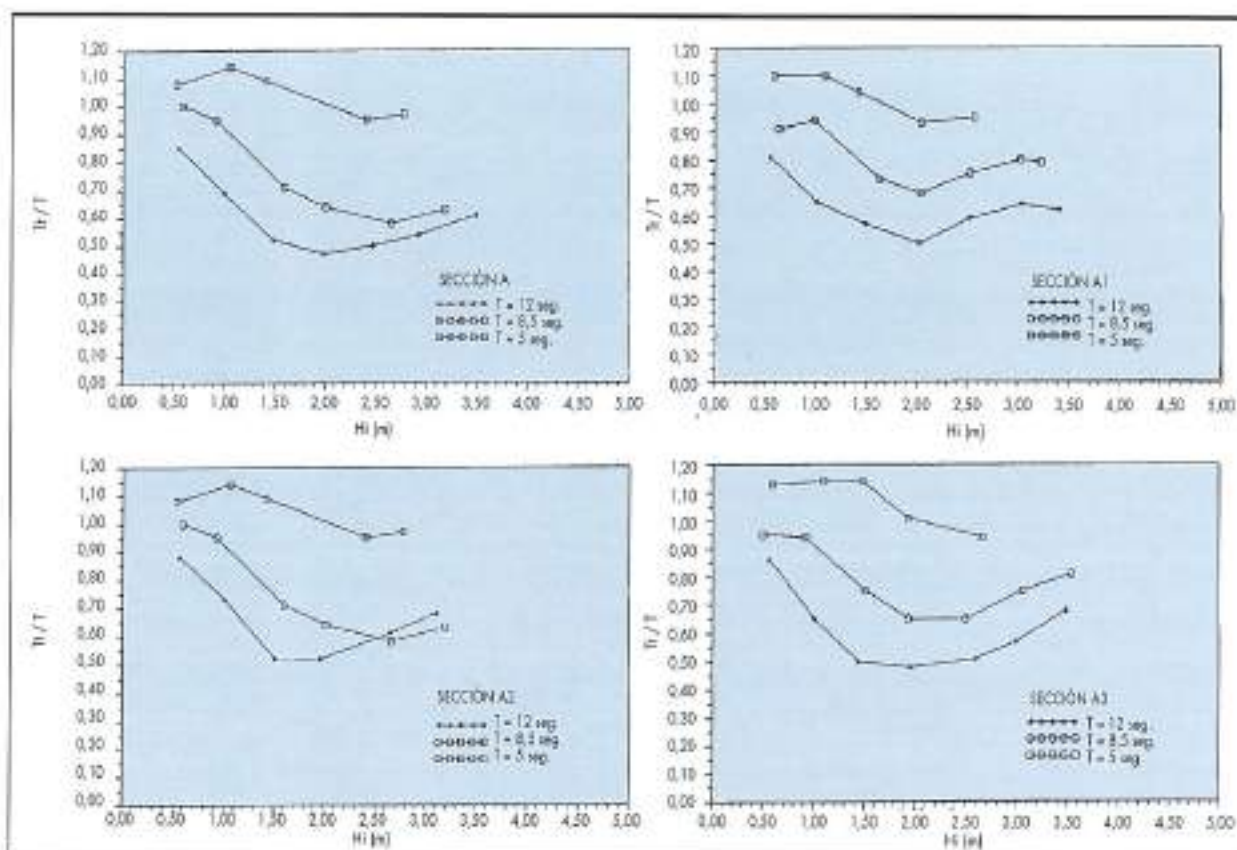


FIGURA 7. Modificación del periodo del oleaje.

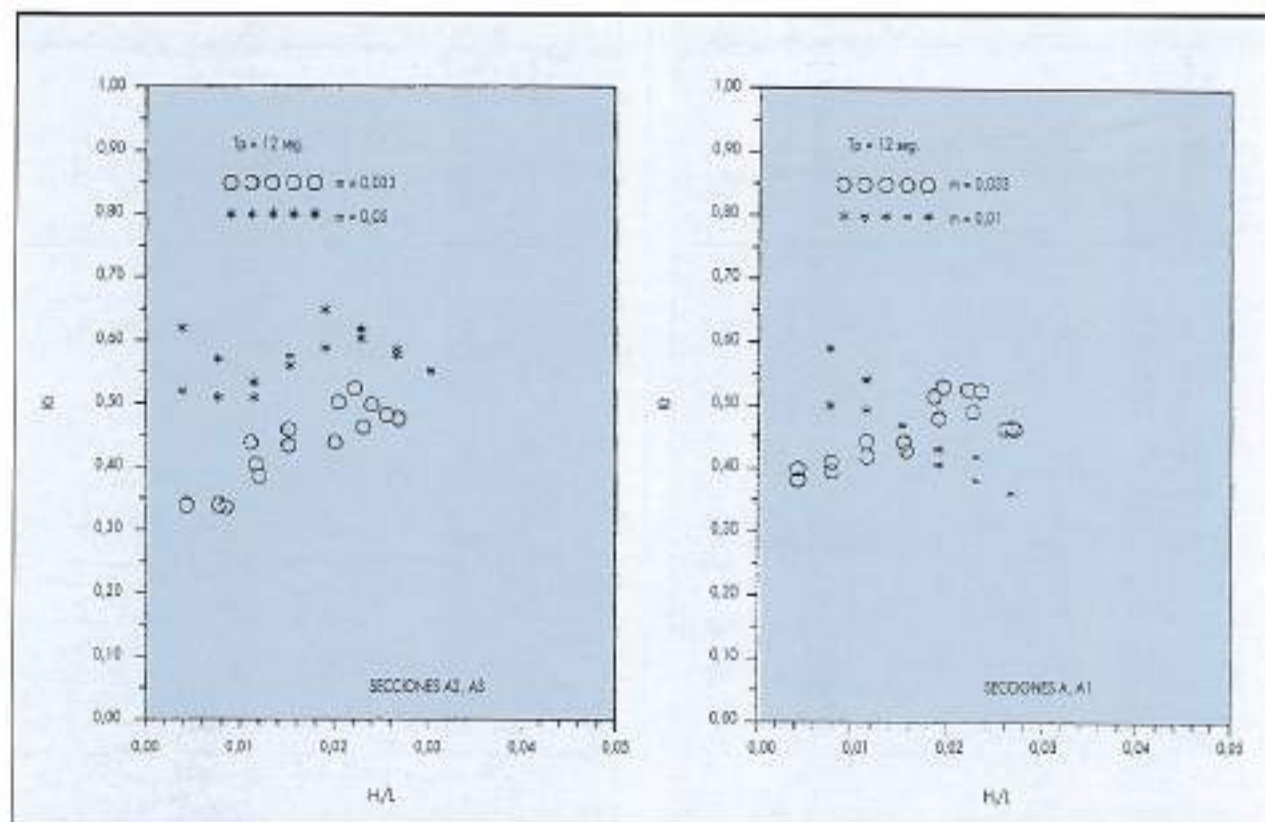


FIGURA 8. Influencia de la pendiente del fondo. $T_p = 12$ seg.

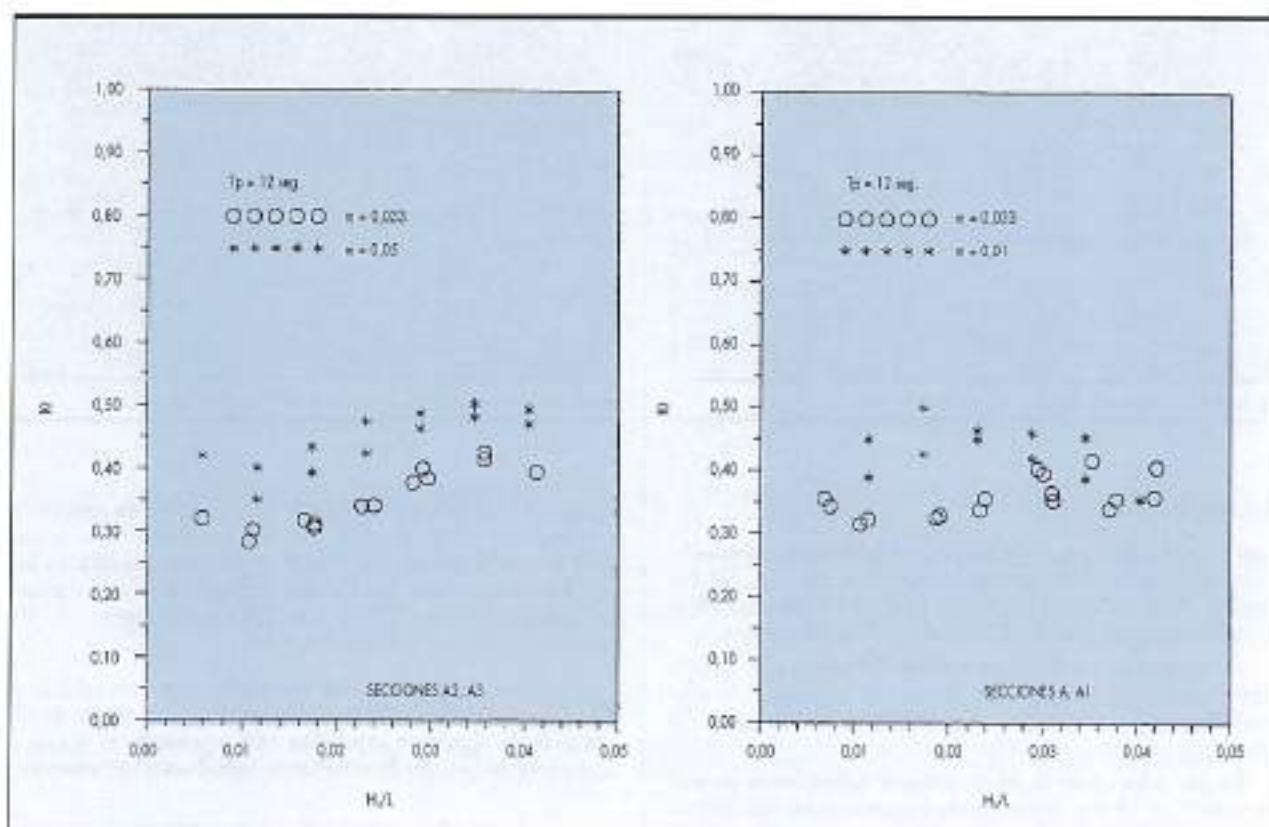
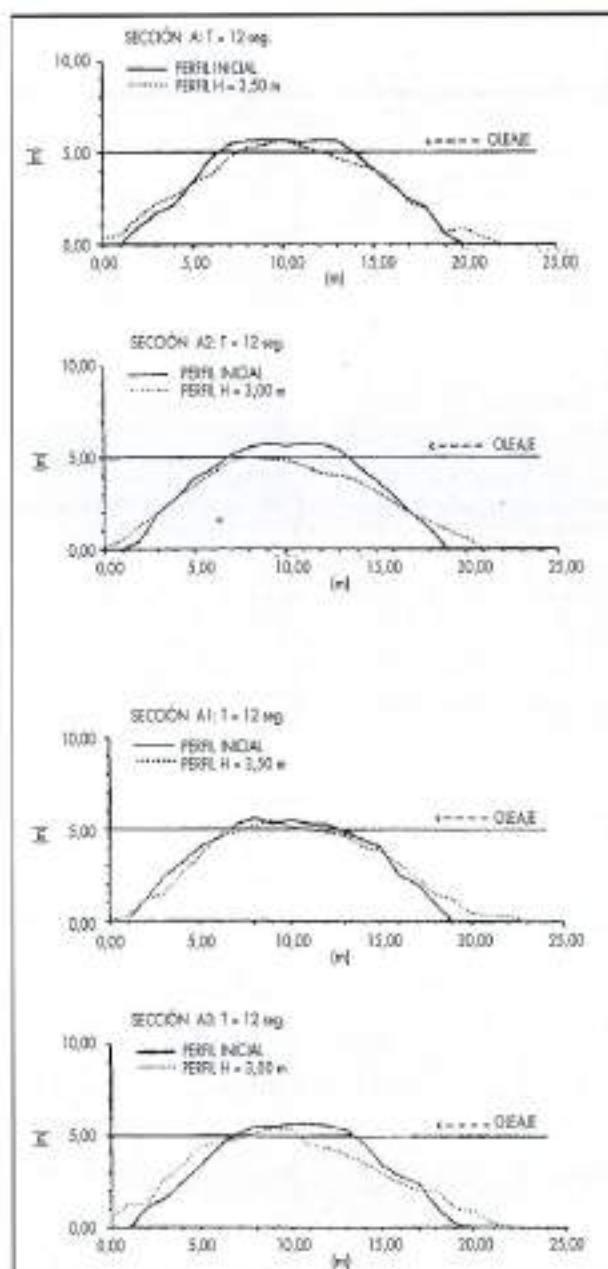


FIGURA 9. Influencia de la pendiente del fondo. $T_p = 6.5$ seg.

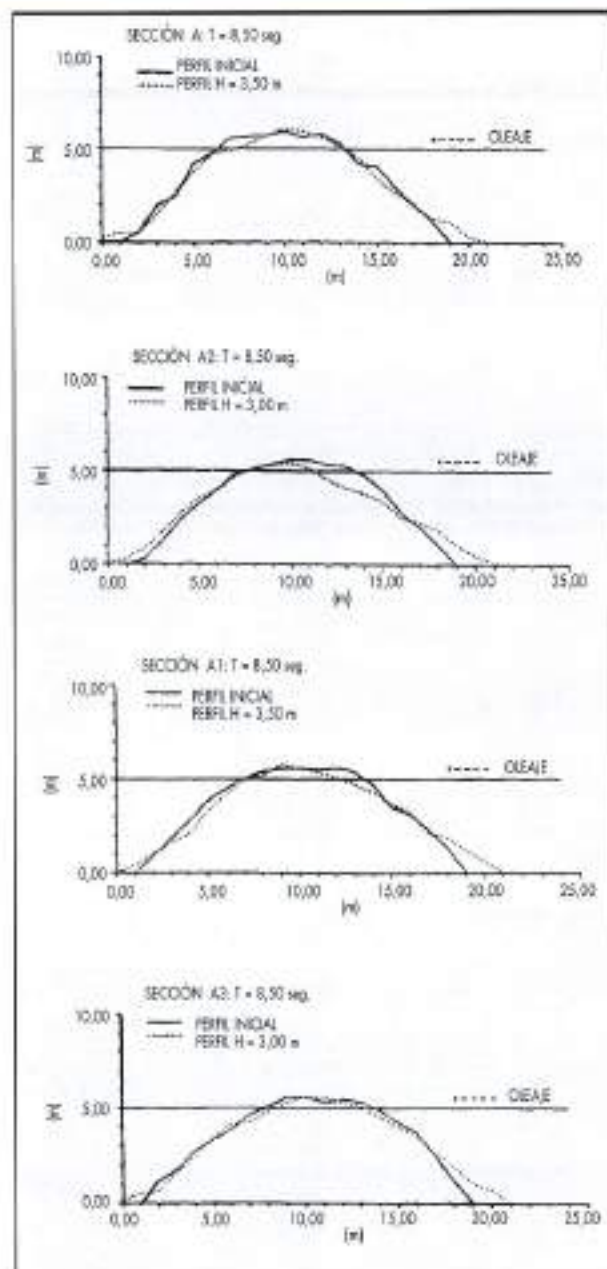

 FIGURA 10. Comparación de perfiles inicial y final. $T_p = 12$ seg.

5.2. ESTABILIDAD

Las averías en este tipo de diques se traducen en una modificación de las características geométricas iniciales. En las figuras 10, 11 y 12, se recogen los perfiles finales de las secciones comparados con los tomados antes de los ensayos.

La característica fundamental de las averías es la pérdida o reducción de la cota de coronación del dique y la acumulación de los elementos desprendidos a ambos lados del mismo.

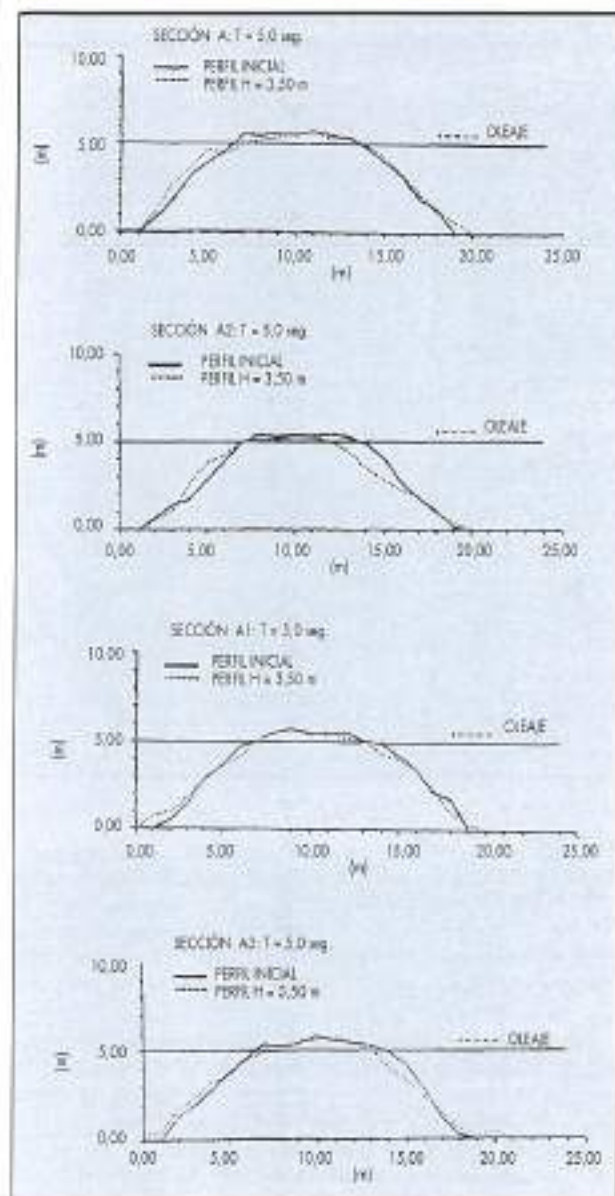
En todos los casos se observó mayor deformación para el período $T_p = 12$ seg, presentando mayores daños las secciones construidas con elementos de menor peso. El análisis global de estabilidad se presenta en la figura 13, en base al


 FIGURA 11. Comparación de perfiles inicial y final. $T_p = 8,5$ seg.

número de estabilidad espectral N_s^* y al factor de reducción de altura de coronación h/h' para los tres temporales de ensayo con cada una de las secciones. La concordancia de los resultados obtenidos con los límites propuestos por Ahrens de inicio de averías $N_s^* = 6$, y de aumento progresivo de las mismas $N_s^* = 8$, es bastante aceptable.

Este autor, a partir de los resultados de su estudio, propuso, para el análisis del factor de reducción de altura de coronación, la siguiente expresión, que representa el ajuste a una curva de la nube de resultados obtenidos en sus ensayos:

$$\frac{h}{h'} = \exp \left(-0,00005 (N_s^*)^{2,1} \right)$$


 FIGURA 12. Comparación de perfiles inicial y final. $T_p = 5$ seg.

En función de los parámetros h/h' y N_s se presenta en la figura 14 la curva de la ecuación de Ahrens y los resultados obtenidos en este estudio. Estos resultados se ajustan aceptablemente a la ecuación propuesta, con las consiguientes desviaciones debidas a las diferencias existentes entre las condiciones definidas para este estudio y las empleadas por Ahrens.

Además es necesario tener en cuenta que, según la metodología adoptada en estos ensayos no se reparan los daños sufridos después de cada altura de ola significativa, por lo que cada altura de ola significativa comienza (excepto la primera etapa) con un cierto grado de deformación de la sección.

A fin de valorar si un cierto grado de deformación de las características iniciales en una sección determinada, puede o no considerarse admisible, sería necesario comprobar si el

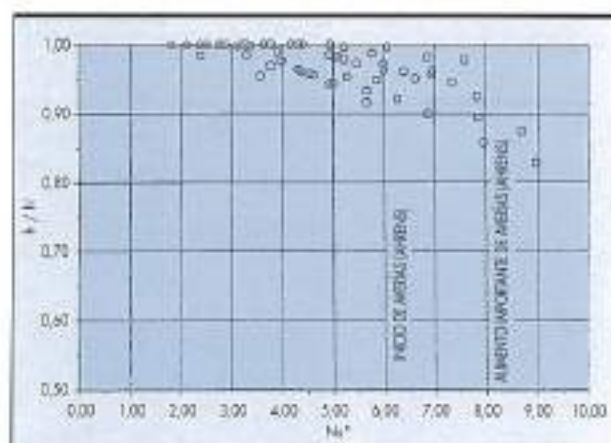


FIGURA 13. Resultados de estabilidad.

dique arrecife mantiene unas condiciones de funcionamiento aceptables. Es decir, si la cantidad de energía que pasa a la zona abrigada, o lo que es lo mismo, si el coeficiente de transmisión, se mantiene dentro de los límites para los cuales el dique ha sido diseñado.

Con objeto de analizar este aspecto, y tal como se explicó anteriormente (Metodología de los ensayos), una vez finalizado el temporal y sin reparar los daños, se realizaron medidas de transmisión de oleaje para varias alturas de ola significativa, obteniéndose los coeficientes K_t después del temporal, pudiéndose comprobar si la modificación de las características geométricas iniciales representaba o no una variación importante en cuanto a los coeficientes de transmisión se refiere.

Para comprobar la transmisión durante el temporal de ensayo y después del mismo, se tomó como referencia el punto 1 de medida por presentar valores más desfavorables.

En la figura 15, los coeficientes de transmisión obtenidos después del temporal, para el de periodo más desfavorable $T_p = 12$ seg, se han representado mediante un círculo (o) y los coeficientes de transmisión medidos durante el ensayo, mediante un asterisco (*). Se puede apreciar que $K_t' > K_t$

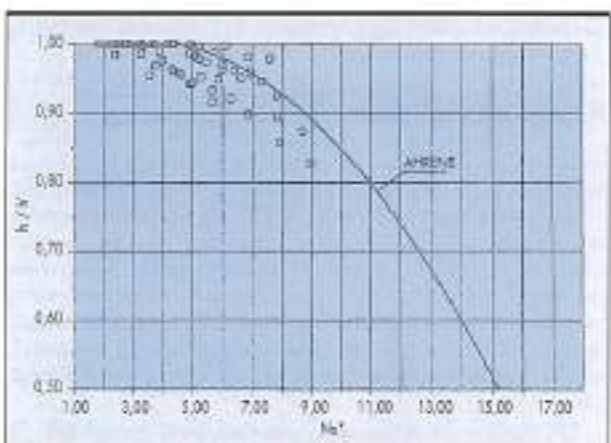
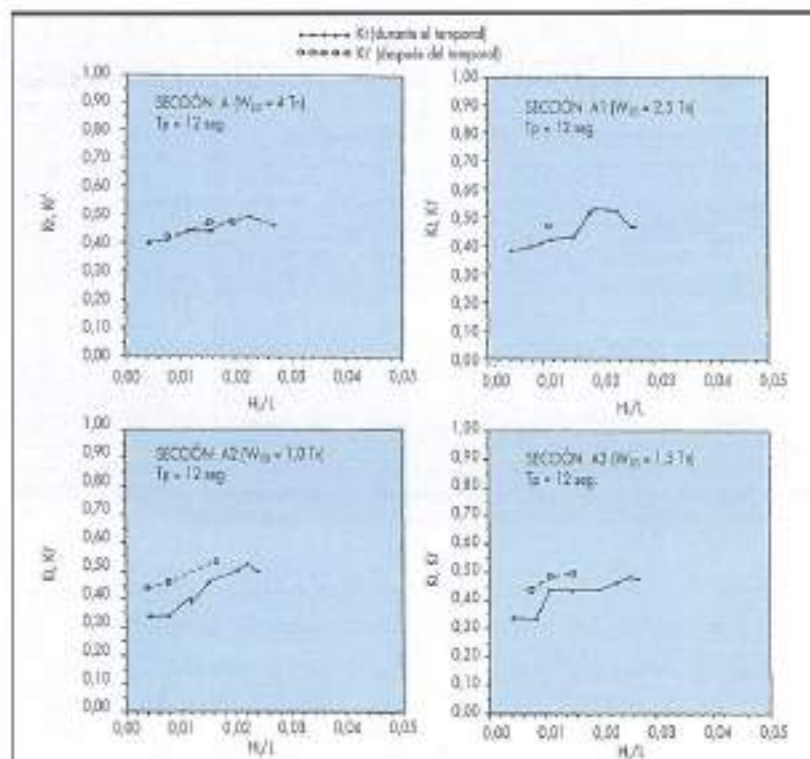


FIGURA 14. Comparación de resultados con ecuación de Ahrens.

FIGURA 15. K_t durante y después del temporal.
 $T_p = 12$ seg.



para las alturas de ola bajas. Para las alturas de ola mayores el valor de K_t' tiende a aproximarse al valor de K_t .

La sección A, que no sufrió prácticamente deformación en el transcurso de las sollicitaciones del temporal de ensayo debido al elevado peso de los elementos de escollera, ha presentado, lógicamente, unos coeficientes de transmisión en las medidas de oleaje realizadas después del temporal, similares a los obtenidos durante el mismo. Sin embargo en la sección A2, la de menor peso, se ha producido un incremento notable entre los coeficientes de transmisión medidos después del temporal, respecto de los obtenidos durante el mismo, debido a que la deformación de esta sección, traducida en una pérdida de cota de coronación, ha sido importante tal como se aprecia en los perfiles de las figuras 11, 12 y 13.

Analizando los gráficos de la figura 15, puede observarse que con la sección A2, se han obtenido incrementos del coeficiente de transmisión superiores al 30% para las alturas de ola incidente de 0,50 y 1,00 m. Para la sección A3, el incremento para las alturas de ola bajas se sitúa entre el 15 y el 20% y para la sección A1 en torno al 10%.

En la figura 16 se comparan los coeficientes de transmisión durante y después de cada uno de los tres temporales de ensayo sobre la sección A2, al ser esta la que sufrió mayores deformaciones. En estos gráficos se puede comprobar que a mayor periodo, las diferencias entre K_t y K_t' son mayores. Esto es debido a que con periodos largos se produce mayor reducción en la cota de coronación, lo que permite el paso de una mayor cantidad de energía del oleaje en comparación con la que pasaba en el transcurso del temporal, cuando aún la sección no había sufrido la máxima deformación.

Tal como se ha dicho anteriormente, para considerar válido un determinado diseño, desde el punto de vista estructural, será necesario comprobar que las condiciones de fun-

cionamiento, (coeficientes de transmisión) se mantienen dentro de los límites previstos. En este sentido, incrementos en el coeficiente de transmisión como los obtenidos para la sección A2 con el periodo de 12 segundos, parecen bastante elevados respecto de los medidos durante el temporal. Ello parece indicar que, para periodos largos, sería conveniente ir a secciones de mayor peso.

Volviendo a la figura 13, puede observarse que para valores del número de estabilidad espectral $N_s < 6$ se han presentado un número de casos en los que ha habido un cierto grado de averías ($h/h' < 1$). Sin embargo, en dichos casos, las condiciones iniciales de funcionamiento de la sección, es decir, el coeficiente de transmisión después del temporal N_s' no ha sufrido prácticamente variación con respecto al obtenido durante el temporal N_s . Esta variación si puede considerarse significativa para valores de $N_s > 7$.

A partir de valores de N_s próximos a 8, se obtienen valores de h/h' inferiores a 0,90. En estos casos se han medido incrementos del coeficiente de transmisión después del temporal K_t' superiores al 25% con respecto al obtenido al inicio del mismo. En base a ello, se puede decir que para los casos en los que se producen deformaciones del perfil inicial, con factor de reducción de la cota de coronación inferior al 0,90, se obtienen incrementos significativos en el coeficiente de transmisión K_t' medida después del temporal.

6. CONCLUSIONES

Como resumen de todo lo anterior y en base a los resultados obtenidos en los ensayos, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- 1) En todos los casos ensayados se ha podido comprobar una notable influencia del periodo del oleaje, tanto en la

capacidad del dique arrecife para amortiguar la energía del temporal, como en la estabilidad de los elementos de escollera que lo constituyen.

- 2) La reflexión del oleaje presenta una tendencia decreciente al aumentar el peralte del oleaje hasta valores de H/L en torno a 0,04, a partir del cual se estabiliza debido a la existencia de roturas de ola.
- 3) La cota de coronación es el parámetro fundamental en este tipo de diques, del que depende en gran medida la mayor o menor eficacia a la hora de reducir la energía del oleaje incidente. Las averías producidas por el oleaje se traducen principalmente en una reducción de dicha cota. En este sentido se ha analizado la estabilidad de las secciones ensayadas mediante el factor de reducción de altura de coronación h/h' y el número de estabilidad espectral N_s propuesto por Ahrens; los resultados de los presentes ensayos han mostrado cierta concordancia con los obtenidos por dicho autor.
- 4) Se puede pensar que para secciones construidas con el mismo peso medio de los elementos de escollera pero diferente distribución en porcentaje de pesos, podrían obtenerse resultados distintos, por lo que parece conveniente analizar otro tipo de distribuciones de pesos, con diferentes relaciones entre los pesos máximo, medio y mínimo.
- 5) Para considerar admisible un cierto grado de averías originadas por un temporal sobre un dique arrecife, es necesario analizar si la deformación y pérdida de cota de coronación producidas, permiten que el coeficiente de transmisión se siga manteniendo dentro de los límites previstos en el diseño.

Se ha comprobado que, a partir de valores del factor de reducción de altura de coronación h/h' inferiores a 0,90, el

coeficiente de transmisión obtenido después del temporal para alturas de ola bajas aumenta de forma significativa con respecto al obtenido al inicio del temporal.

- 6) No se ha podido llevar a cabo un análisis suficientemente fiable del comportamiento de este tipo de diques para diferentes pendientes del fondo, debido a las diferentes condiciones de ensayo existentes entre el estudio de 1984 y actual, aunque muestra una cierta tendencia hacia la obtención de mayores coeficientes de transmisión para pendientes más pronunciadas, debido en parte a la menor pérdida de energía por rotura del oleaje antes de abordar el dique.
- 7) Los ensayos se han realizado considerando incidencia del oleaje normal a la sección, mientras que en la realidad, el frente de oleaje habitualmente llegará al dique con un cierto ángulo. Con incidencia oblicua, el dique arrecife produciría una mayor pérdida de energía sobre el oleaje en la zona abrigada. De esta forma, los coeficientes de transmisión obtenidos en los ensayos con incidencia normal del oleaje, serán algo superiores a los obtenidos en una supuesta incidencia oblicua, y por tanto se estará, en cierto modo, del lado de la seguridad.

Sin embargo, desde el punto de vista de la estabilidad no es posible decir a priori cuál será el mejor o peor comportamiento del dique en función del ángulo de incidencia del oleaje.

- 8) A la hora de analizar la eficacia de este tipo de obras en base al coeficiente de transmisión del oleaje, es necesario indicar el punto de la zona abrigada que se está considerando, ya que el oleaje transmitido también puede verse sujeto a variaciones en su propagación hacia la costa.

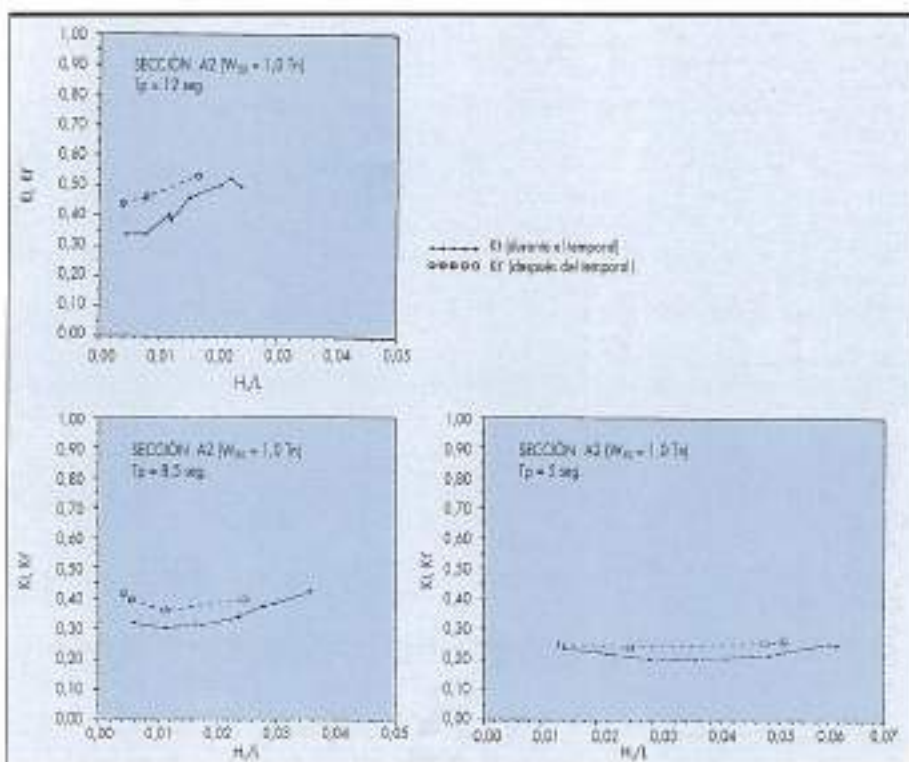


FIGURA 16. K_t durante y después del temporal. Sección A2.

9) Dada la importancia cada vez más creciente de los diques arrecife, parece conveniente estudiar, mediante sucesivos ensayos, la influencia de otros parámetros que intervienen en su diseño.

- Cota de coronación
- Anchura de coronación
- Taludes del dique
- Profundidad a pie de obra
- Ángulo de incidencia del oleaje
- Factor y del espectro de oleaje
- Diferentes distribuciones de pesos de escollera

7. BIBLIOGRAFÍA

- AHRENS, J. P., 1987. "Characteristics of Reef Breakwaters". CERC, Vicksburg, Technical Report CERC-87-17.
- AHRENS, J. P., 1989. "Stability of Reef Breakwaters". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 115, No. 2, Marzo 1989.
- ESCUTIA, R., 1984. "Ensayos sobre Diques Arrecife para Defensa de Costas". CEPYC-CEDEX, 1984.
- GODA, Y. y SUZUKI, Y., 1976. "Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments". *Proceedings of the 15th Coastal Engineering Conference*, p. 828-845.
- VALDÉS, J. M. "Ensayos sobre Diques Arrecife para Defensa de Costas (II)". CEPYC-CEDEX, 1992.
- VAN DER MEER, J. W., 1990a. "Low-Crested and Reef Breakwaters". CUR C67, Delft Hydraulics. Marzo 1990.
- VAN DER MEER, J. W., 1990b. "Stability of Low-Crested and Reef Breakwaters". *Proceedings of 22nd Coastal Engineering Conference*, p. 1.375-1.388.