

MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS

SECRETARIA DE OBRAS PÚBLICAS

SUBSECRETARIA DE RECURSOS HIDRICOS



**SISTEMA DE ROMPEOLAS PARA DEFENSA COSTERA
EN MAR DEL PLATA**

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA DE
LA TRANSMISION DE OLEAJE Y ESTABILIDAD DE CORAZA**

Informe Final

Noviembre, 2010
Informe LHA- 314-01-10

LABORATORIO DE HIDRAULICA

SISTEMA DE ROMPEOLAS PARA DEFENSA COSTERA EN MAR DEL PLATA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA DE LA TRANSMISION DE OLEAJE Y ESTABILIDAD DE CORAZA Informe Final

RESUMEN

El presente informe se refiere a la modelación física en escala reducida de la sección transversal de un rompeolas de baja cota de coronación, el cual es parte de un sistema de rompeolas que se proyecta construir para la defensa contra la erosión costera en un tramo de playa al sur de Punta Mogotes, Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, según la solicitud realizada por la UTE ALPA VIAL S.A. - Gerónimo Rizzo S.A.

La protección indicada estará formada por un conjunto de rompeolas con su eje longitudinal aproximadamente paralelo a la costa, con cota de coronamiento próxima al nivel medio del mar y la estructura constituida por enrocado.

Los ensayos hidráulicos fueron realizados en el canal de olas disponible en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua

PALABRAS CLAVE: rompeolas aislado de baja cresta, erosión, protección de costas, Modelo Físico, Mar del Plata

Informe	LHA-314-01-10
Fecha	Noviembre, 2010
PROYECTO	983
COMITENTE	G. Rizzo S. A. – Alpa Vial S. A.



*Sistema de Rompeolas para Defensa Costera en
Mar del Plata
Estudio Mediante Modelación Física de
la Transmisión de Oleaje*

INA
LABORATORIO DE HIDRAULICA

DIRECTOR

Ing. J.C. DE LIO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

Ing. R. D. CASTELLANO

Informe producido por

Ing. R. A. CÁCERES

Equipo de trabajo

M.M.O. S.L. PERALTA

Téc. Mec. C.A. HASPERT

Fotografía y video

Sta. B. MORENO

Electrónica e Instrumentación

Ing. G. TATONE

Sr. J. IZQUIERDO

**SISTEMA DE ROMPEOLAS PARA DEFENSA COSTERA
EN MAR DEL PLATA**

**ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA DE
LA TRANSMISION DE OLAJE Y ESTABILIDAD DE CORAZA**

INDICE

1	INTRODUCCION	5
2	OBJETIVOS.....	7
3	DESCRIPCION DE LA OBRA.....	8
4	CONDICIONES HIDRODINAMICAS.....	11
5	MARCO TEORICO	13
5.1	Transmisión del oleaje	13
5.2	Estabilidad del enrocado	16
6	DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTALES.....	18
7	DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO.....	19
7.1	Principio de Semejanza.....	19
7.2	Leyes de Similitud	20
7.3	Efectos de Escala	21
7.4	Selección de la escala.....	23
7.5	Estructura del rompeolas.....	23
7.6	Metodología de ensayo	24
8	RESULTADOS	26
8.1	Transmisión del oleaje	26
8.2	Transmisión en modelo físico 2D a gran escala	28
8.3	Transmisión en modelo físico 3D.....	30
8.4	Variación del Período del oleaje.....	33
8.5	Estabilidad.....	35
9	CONCLUSIONES.....	36
10	REFERENCIAS.....	37
	ANEXO I.....	38

SISTEMA DE ROMPEOLAS PARA DEFENSA COSTERA

EN MAR DEL PLATA

ESTUDIO MEDIANTE MODELACIÓN FÍSICA DE LA TRANSMISION DE OLEAJE Y ESTABILIDAD DE CORAZA

Informe Final

Noviembre, 2010

1 INTRODUCCION

El extenso litoral atlántico argentino presenta numerosos ejemplos de áreas afectadas por procesos erosivos. La erosión tiene importantes consecuencias tanto sobre la degradación de los sistemas naturales como también implicancias socio-económicas sobre las comunidades y las actividades humanas que se desarrollan en esas áreas costeras.

En el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua se desarrolló un estudio mediante modelación física en escala reducida de un rompeolas, el cual es parte de un sistema de protección que se proyecta construir para la defensa contra la erosión costera en un tramo de playa al sur de Punta Mogotes en la ciudad de Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires.

El estudio involucró la realización de ensayos bidimensionales de la sección transversal de la obra, cuya construcción se ha previsto en enrocado. Se estudió en particular su capacidad de atenuar el oleaje que alcanza la línea costera y la resistencia estructural de la obra ante el impacto del oleaje.

La obra presenta la particularidad de tener su cota superior en correspondencia con el nivel medio del mar y su eje longitudinal aproximadamente paralelo a la línea de costa, conformando lo que se denomina un sistema de rompeolas aislado de baja cresta, y una de cuyas importantes ventajas reside en su bajo impacto visual y su menor interferencia con el uso recreativo de la playa.

Este tipo de estructura constituye una solución novedosa de defensa costera en Argentina, donde los problemas de erosión costera, en particular en el área de la costa marplatense, han sido abordados mediante la construcción de sistemas de espigones transversales a la playa.

Los ensayos hidráulicos desarrollados en esta etapa comprenden el estudio del funcionamiento hidráulico de la sección transversal de un rompeolas de baja cresta.

Dadas las características de la obra, su eficiencia en cuanto al control de la energía del oleaje que se transmite hacia la playa depende fuertemente del nivel del mar respecto de su cota de coronamiento.

Por eso, el estudio de coeficiente de transmisión del oleaje (relación entre la altura de ola detrás del rompeolas y la altura incidente frente al mismo) es uno de los factores más importantes para la definición del proyecto de protección costera.

2 OBJETIVOS

El propósito de los estudios hidráulicos desarrollados fue el de evaluar el comportamiento hidráulico de la sección transversal de la obra, cuya construcción se ha previsto íntegramente en enrocado.

Los aspectos básicos estudiados fueron la transmisión del oleaje sobre y a través de una sección del rompeolas, y la estabilidad de la coraza y el pie de protección.

Los estudios se realizaron mediante un modelo bidimensional a fondo fijo. Esto implica que los efectos morfológicos sobre la playa o la transmisión de energía por efectos de difracción en los extremos de los rompeolas no han sido considerados. El coeficiente de transmisión determinado a partir de los ensayos podrá ser aplicado a la modelación matemática de la evolución morfológica de la línea de costa.

3 DESCRIPCION DE LA OBRA

La obra de protección costera proyectada comprende la construcción de un sistema de rompeolas de baja cresta, cuyo eje longitudinal se encuentra aproximadamente paralelo a la línea de costa, y separado de ésta a una distancia superior a los 200 m, en correspondencia con las isobatas de 4 y 5 m. La zona a proteger está ubicada al sur de Punta Mogotes, Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires, frente al barrio denominado “Los Acantilados”. En la **Figura 1.1** se presenta una imagen satelital de la zona de interés, y en la **Figura 1.2** y **Figura 1.3** dos vistas de la playa y acantilados, en donde se observa el desarrollo de severos procesos erosivos.



Figura 1.1: Playas al sur de Punta Mogotes



Figura 1.2: Vista de la playa y acantilados al sur de Punta Mogotes



Figura 1.3: Vista de los acantilados al sur de Punta Mogotes

La obra de protección costera consiste en la construcción de un sistema de varios rompeolas de baja cresta, cuya sección transversal con las diferentes capas que lo conforman se presenta en las Figura 1.4.

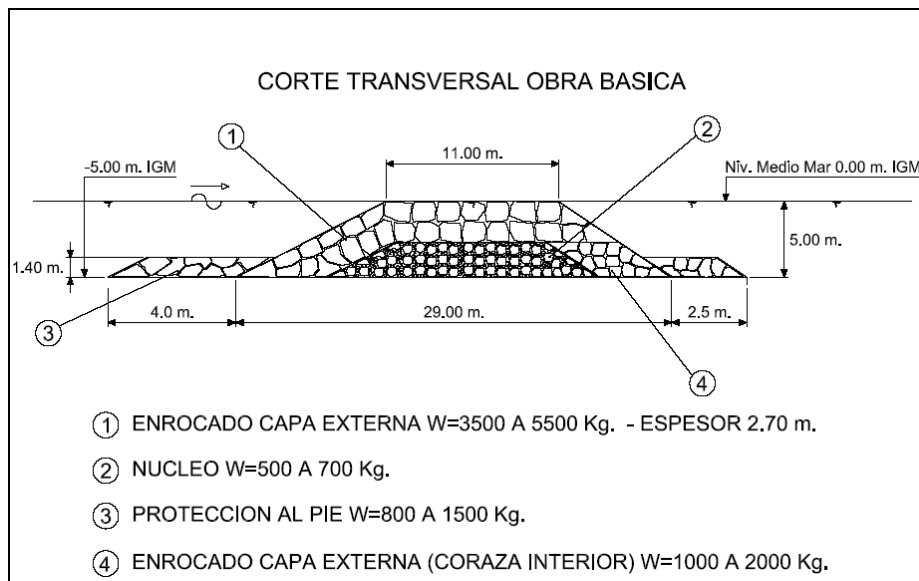


Figura 1.4: Sección transversal de rompeolas de baja cresta

Su función consiste en reducir o atenuar la energía del oleaje que alcanza y se disipa en la playa, reduciendo de esa manera su capacidad de transportar arena, favoreciendo así su retención en el área protegida.

4 CONDICIONES HIDRODINAMICAS

Las condiciones hidrodinámicas están determinadas por la altura y período de ola incidente, y nivel de mar. Los escenarios para el diseño de la obra y la evaluación en modelo físico fueron establecidos por el Comitente y se presentan en la Tabla 4.1. Estos escenarios fueron evaluados mediante modelación matemática por el Comitente para determinar las condiciones de oleaje al pie de la obra. Para los mismos se consideraron 5 niveles de mar (Nivel medio, Pleamar máxima, y para recurrencias de 2 y 50 años), y distintas alturas de ola variable probables en aguas profundas con períodos de 6, 7 y 8 segundos.

Tabla 4.1: Escenarios hidrodinámicos para la modelación física. Condiciones al pie de la estructura determinadas del modelo matemático de olas

Período Tp(seg)	Altura de ola offshore Hs (m)	Nivel 0m nivel medio Ola pie de la estructura Hs _{medio} (m)	Nivel 1.12m máxima pleamar Ola pie de la estructura Hs _{1.12m} (m)	Nivel 1.72m rec 2 años Ola pie de la estructura Hs _{1.72m} (m)	Nivel 2.19m rec. 50 años Ola pie de la estructura Hs _{2.19} (m)
7.14	1	0.95	0.94	0.93	0.93
7.14	2.5	2.37	2.34	2.33	2.32
7.14	4	2.57	3.09	3.35	3.55
7.14	6	2.57	3.09	3.35	3.55
7.14	7.74	2.57	3.09	3.35	3.55

Período Tp(seg)	Altura de ola offshore Hs (m)	Nivel 1.72m rec 2 años Ola pie de la estructura Hs _{1.72m} (m)
6	1	0.91
6	2.5	2.28
6	4	3.07
6	6	3.07

Período Tp(seg)	Altura de ola offshore Hs (m)	Nivel 1.72m rec 2 años Ola pie de la estructura Hs _{1.72m} (m)
8	1	0.95
8	2.5	2.38
8	4	3.44
8	6	3.44
8	7.74	3.44

En adelante se ha utilizado la nomenclatura H_i , H_t , H_s y H_{mo} para designar la altura del oleaje. En particular H_i es la altura de ola incidente, y H_t la altura de ola transmitida al lado protegido, pero en ambos casos se trata de la denominada altura de significativa H_s , que es una medida de la energía del oleaje.

Cuando H_s se determina a partir del espectro de densidad de energía resulta $H_s \approx 4 m_0^{1/2} = H_{m0}$, donde m_0 es el momento de orden cero del espectro, que representa la energía total contenida en el espectro. Es decir, en este informe la nomenclatura H_i , H_t , H_s , H_{m0} usada en las distintas referencias será considerada equivalente en tanto que se refiere a altura significativa del oleaje.

5 MARCO TEORICO

Los rompeolas de escollero son las obras más comúnmente utilizadas para la protección de áreas costeras o puertos contra la acción del oleaje. Estas estructuras disipan la energía del oleaje por los procesos de: 1) rotura; 2) fricción sobre y en el interior del macizo granular durante transmisión del oleaje hacia la parte abrigada.

Desde el punto de vista funcional, la transmisión de energía sobre y a través de la escollera son condicionantes fundamentales del diseño. En este capítulo se presentan las fórmulas que sirven para estimar la transmisión del oleaje para el tipo de estructuras en estudio.

5.1 Transmisión del oleaje

El proceso hidrodinámico que tiene lugar al incidir el oleaje sobre un rompeolas de baja cresta y paralelo a la costa es el siguiente:

- 1) Reflexión parcial de la energía del oleaje incidente debido a la presencia de la barrera artificial que supone el rompeolas.
- 2) El paso del oleaje al otro lado del rompeolas mediante la acción de dos fenómenos simultáneos: difracción del oleaje alrededor de los extremos de la estructura, y transmisión de la energía incidente a través de la estructura y por encima de la cresta.

El proceso de transmisión de la energía queda caracterizado por el coeficiente de transmisión, definido como la relación existente entre la altura de ola transmitida y la altura de ola incidente sobre el rompeolas:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}, \quad 0 < K_t < 1 \quad [5.1]$$

Donde:

K_t : Coeficiente de transmisión.

H_t : Altura de ola transmitida.

H_i : Altura de ola incidente.

Estimación del coeficiente de transmisión

Van der Meer (1990a y 1990b) propuso una relación analítica para K_t que tuviese en cuenta los principales factores que controlan el proceso de transmisión: el francobordo, R_c (altura del coronamiento sobre el nivel del mar), y la altura de ola significativa a pie

del rompeolas, H_s . Dicha expresión empírica se obtiene sobre la base de una larga serie de medidas realizadas en diferentes tipos de rompeolas de paralelos a la costa, y su formulación sigue el siguiente esquema:

$$K_t = \begin{cases} 0,80 & -2 < \frac{R_c}{H_s} < -1,13 \\ 0,46 - 0,30 \frac{R_c}{H_s} & -1,13 < \frac{R_c}{H_s} < 1,2 \\ 0,10 & 1,2 < \frac{R_c}{H_s} < 2 \end{cases} \quad [5.2]$$

En la **Figura 5.1** se presenta la curva para estimar el coeficiente de transmisión según la **ecuación 5.2** y la base de datos experimentales a partir de la cual fue generada.

Según la ec. 5.2. la altura de ola transmitida depende linealmente de la altura de ola incidente, y adicionalmente varía también linealmente con la sumergencia de la cresta de la estructura dentro del rango $-1.13 < R_c/H_s < 1.20$.

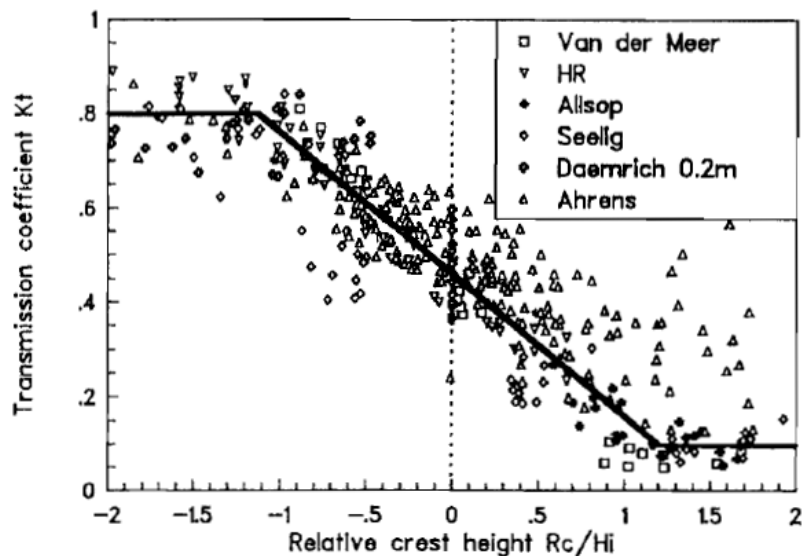


Figura 5.1: Transmisión de del oleaje en función de la altura sobre la cresta relativa a la altura de ola incidente (imagen obtenida de d'Angremond et al., 1996).

Los valores mínimo y máximo de transmisión no alcanzan los valores límite de $K_t = 0$ y $K_t = 1$, sino que son $K_t = 0.1$ y $K_t = 0.8$ respectivamente. Ello es debido a que la expresión lleva implícita unas bandas de confianza del 90% que tienen en cuenta las imprecisiones que puedan producirse en las mediciones. En la figura además se trazaron dos límites que consideran una dispersión de ± 0.15 para el valor de K_t .

Van der Meer et al. (2004) recopilaron y reanalizaron una gran cantidad de ensayos hidráulicos sobre rompeolas de baja cresta en modelación física en el marco del

proyecto Europeo DELOS¹. Como resultado de este análisis se establecieron dos ecuaciones para la determinación del coeficiente de transmisión para rompeolas de enrocado. Una de ellas para rompeolas de cresta ancha ($B/H_i > 10$) y otra para rompeolas de cresta angosta ($B/H_i < 10$), la cual fue utilizada en el presente estudio para contrastar los resultados obtenidos en la modelación.

La ecuación para rompeolas de cresta angosta es la siguiente (d'Angremond et al., 1996):

$$K_t = -0.4 \frac{R_c}{H_i} + C \left(\frac{B}{H_i} \right)^{-0.31} * (1 - \exp(-0.5 \xi_{op})) \quad [5.3]$$

Donde:

R_c : es la distancia vertical entre el pelo de agua y el coronamiento de la estructura, y se denomina francobordo. Si es negativo significa que la estructura está sumergida.

H_i : es la altura de ola incidente sobre la estructura.

B : es el ancho de coronamiento.

ξ_{op} : Es el número de Iribarren y es un parámetro adimensional que relaciona el oleaje y la pendiente del talud. Su fórmula es:

$$\xi_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}} \quad [5.4]$$

C : es un coeficiente que tiene en cuenta la permeabilidad de la estructura. El mismo es función de la relación H_i/D_{n50} , donde D_{n50} es el diámetro nominal del enrocado. Valores pequeños de H_i/D_{n50} indican la presencia de un enrocado de gran tamaño, el cual incrementa la permeabilidad y así aumenta la transmisión del oleaje. No obstante, a mayor tamaño del enrocado habría un aumento de la rugosidad y como consecuencia mayor disipación de la energía del oleaje.

En la **Figura 5.2** se presenta la base de datos recopiladas por Van der Meer et al. (2004) contrastado con los valores obtenidos por las ecuaciones para rompeolas de cresta ancha y angosta. En este último caso la ecuación [5.3] fue la utilizada para determinar el coeficiente de transmisión K_t , y el coeficiente C propuesto por dichos investigadores fue **0.64**.

¹ **DELOS**: es un acrónimo de Environmental Design of Low Crested Coastal Defence Structures. DELOS es un proyecto en el cual participaron cerca de 20 instituciones europeas. El proyecto tiene el objetivo de promover un efectivo y ambientalmente compatible diseño de las estructuras de baja cresta (denominados en inglés como Low Crested Structures, LCS), para la protección de las costas Europeas contra la erosión, la preservación de los ambientes litorales, así como también los desarrollos económicos costeros.

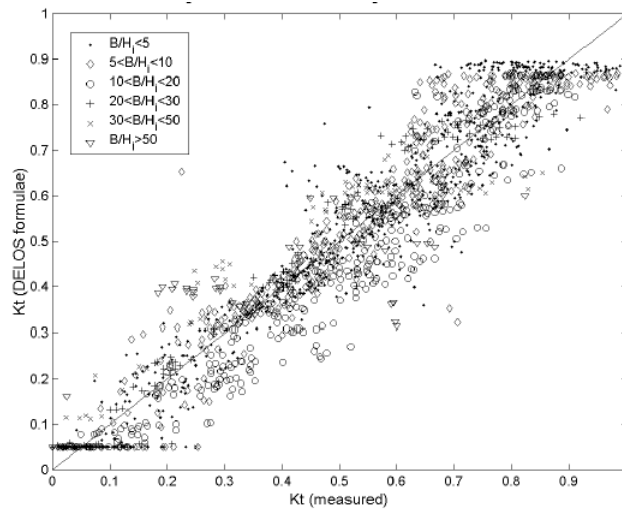


Figura 5.2: Comparación entre los valores medidos y calculados del coeficiente de transmisión (imagen obtenida de Van der Meer et al. 2004)

5.2 Estabilidad del enrocado

Para rompeolas convencionales, solo una pequeña parte de la energía del oleaje incidente pasa sobre y a través de la estructura. El daño, por lo tanto, ocurre principalmente en la cara frontal de la obra. Para rompeolas de baja cresta, una fracción considerable de la energía pasa sobre la estructura y por lo tanto lo hace más estable y el tamaño del enrocado de protección resulta menor.

Los modelos numéricos resultan aún poco confiables para describir el fenómeno de estabilidad, especialmente en sectores con procesos tridimensionales. Por esa razón las principales ecuaciones de diseño del enrocado de protección provienen de modelación física. Entre los estudios más relevantes se encuentran el de van der Meer y Daemen (1994) y Kramer y Burcharth (2002) en el marco del proyecto europeo DELOS.

Como se explicó anteriormente, bajo el ataque del oleaje los rompeolas de baja cresta aumentan su estabilidad a medida que el nivel de agua aumenta. Cuando los rompeolas son emergentes pueden sufrir un leve daño en el talud frontal (**Figura 5.3**), mientras que cuando están sumergidos se provoca una deformación de la estructura durante las condiciones más severas hasta llegar a un equilibrio dinámico (**Figura 5.4**).

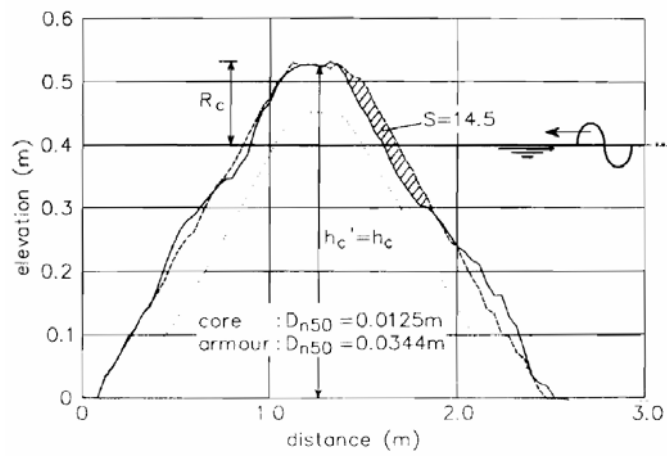


Figura 5.3: Ejemplo de daño en rompeolas de baja cresta en condición emergente (van der Meer y Daemen, 1994).

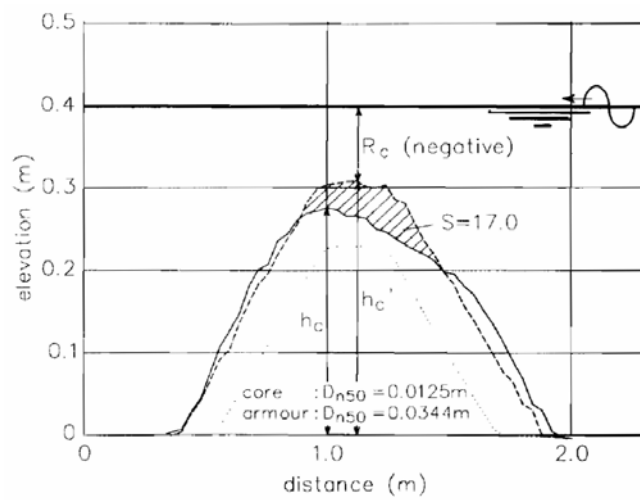


Figura 5.4: Ejemplo de daño en rompeolas de baja cresta en condición sumergido (van der Meer y Daemen, 1994).

6 DESCRIPCION DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

Los ensayos se llevaron a cabo en un canal de olas de 28 m de largo, por 0.60 m de ancho y una profundidad de 1.00 m. Con un generador de olas oleohidráulico de alta presión, controlado por una servoválvula. En la **Figura 6.1** se presenta un esquema de las instalaciones experimentales disponibles

La medición de altura de ola se realizó mediante un conjunto de dos grupos de tres sondas separadas entre sí a una distancia variable entre 30 y 50cm de acuerdo al período de las olas utilizado para la escala correspondiente. Los conjuntos de sondas se ubican, uno frente a la obra y el otro en la zona protegida. Las señales eléctricas emitidas por las sondas son convertidas en valores digitales de tensión y almacenadas en una computadora para su procesamiento.

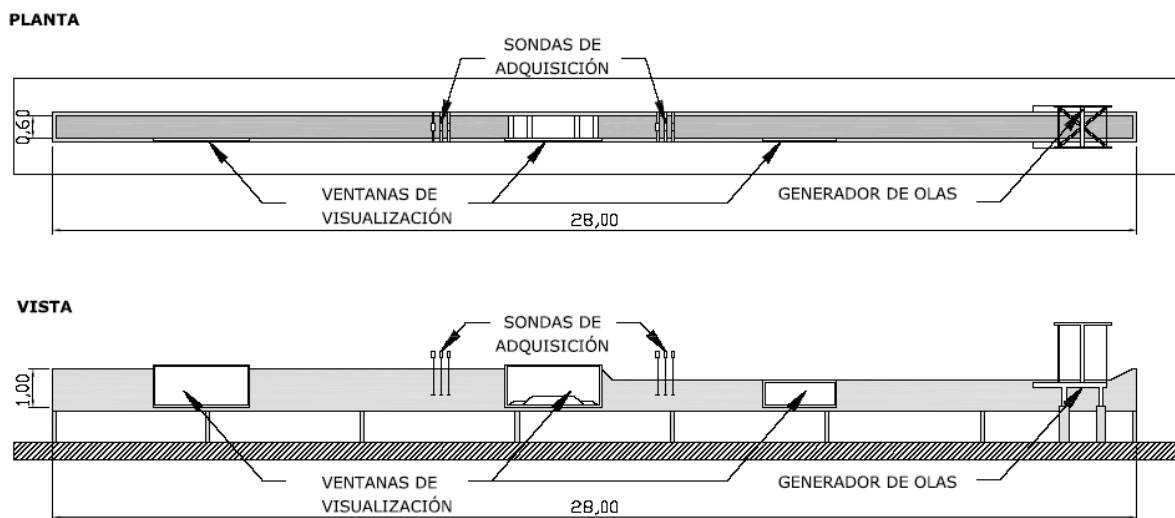


Figura 6.1. Canal de olas del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua

7 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL MODELO

Los estudios en modelo físico bidimensional permiten evaluar, bajo condiciones controladas, el comportamiento estructural y funcional de obras marítimas afectadas por solicitaciones provocadas por diversos escenarios hidrodinámicos.

Mediante este tipo de estudios es posible verificar y optimizar el diseño realizado previamente mediante la aplicación de fórmulas de estabilidad o transmisión y llegar de esta manera a un diseño final confiable y óptimo desde un punto de vista técnico-económico.

7.1 Principio de Semejanza

La técnica de la modelación física se apoya en el principio de semejanza. Este es un concepto abstracto basado en el principio de homogeneidad. Para una teoría física dada, este principio permite deducir las condiciones a las cuales deben sujetarse dos procesos para que la relación entre las medidas de sus magnitudes homólogas sea constante. Es decir, se consideran dos sistemas físicos (en este caso, el modelo a escala y el sistema real o prototipo) que presentan comportamientos semejantes en relación con algunos fenómenos. Así pues, aunque con ciertas limitaciones, las medidas efectuadas sobre algunas magnitudes físicas en el modelo permiten anticipar el comportamiento del sistema real (Córdova, 1999).

Para que los resultados obtenidos en un modelo a escala puedan ser tomados como representativos de la realidad, aquél debe cumplir ciertas condiciones denominadas “leyes de semejanza”. Se consideran tres tipos de semejanza:

- Semejanza geométrica: Permite relacionar las dimensiones del modelo con las del prototipo a través de una o varias transformaciones geométricas. Se define entonces a la escala de longitudes como la relación entre las longitudes homólogas en prototipo (p) y modelo (m):

$$e_L = \frac{L_p}{L_m} \quad [7.1]$$

- Semejanza cinemática: Añadiendo a las relaciones geométricas una escala de tiempos, que permite relacionar las velocidades y aceleraciones de modelo y prototipo. Se define la escala de tiempos como la relación entre los tiempos homólogos en prototipo (p) y modelo (m):

$$e_t = \frac{t_p}{t_m} \quad [7.2]$$

- Semejanza dinámica: Presupone las anteriores y añade las escalas de fuerzas existentes en el fenómeno objeto de estudio. Para ello debe haber una relación constante entre las masas de los elementos homólogos:

$$e_M = \frac{M_p}{M_m} \quad [7.3]$$

La semejanza dinámica entre dos sistemas exige que todas las fuerzas actuantes mantengan una relación constante entre ambos sistemas.

7.2 Leyes de Similitud

En los procesos hidráulicos intervienen las propiedades físicas del fluido (densidad, viscosidad, compresibilidad y tensión superficial) y las acciones exteriores como la atracción gravitatoria, la elasticidad de los cuerpos en contacto con el fluido, y la presión atmosférica actuante sobre la superficie libre del fluido.

La semejanza de fuerzas viscosas, de compresibilidad, tensión superficial y fuerzas gravitatorias entre dos sistemas (condición necesaria para la existencia de la semejanza dinámica) puede expresarse mediante las relaciones adimensionales entre distintas variables que determinan el problema, denominadas números de Reynolds, Rayleigh, Weber, Froude, Cauchy respectivamente.

El principio de semejanza exige que los números indicados tengan igual valor en prototipo y modelo. Si el fluido a utilizar en el modelo es agua (lo mismo que en el prototipo) y puesto que la aceleración gravitatoria es también la misma en modelo y prototipo, puede demostrarse que la condición indicada (es decir la igualdad de todos los números adimensionales) es imposible de satisfacer simultáneamente si la escala geométrica entre ambos sistemas es distinta de 1. En la generalidad de los casos, ello obliga a evaluar cuáles son los procesos dominantes en el sistema y elegir en función de ello la ley de semejanza correspondiente, descartando el resto de las fuerzas.

En particular el Número de Froude \mathcal{F} , representa la relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad en un sistema y se expresa mediante el número adimensional dado por:

$$F = \frac{v^2}{g \cdot d} \quad [7.4]$$

En la ec. [7.4.] v es una velocidad, g la aceleración de la gravedad y d una dimensión espacial.

Para que dos sistemas en los que las fuerzas de gravedad y de inercia son los dominantes sean dinámicamente semejantes, se requiere que se mantenga la misma relación de fuerzas en ambos sistemas. Si los subíndices m y p se refieren a los sistemas “modelo” y prototipo”, lo expresado arriba implica:

$$\mathcal{F}_m = \mathcal{F}_p \quad [7.5]$$

Siendo e_L la escala geométrica del modelo, y puesto que se mantiene la aceleración de la gravedad es la misma en ambos sistemas, ($g_p / g_m = 1$), al aplicar la ley de semejanza [7.5] se obtienen las escalas correspondientes a otras magnitudes físicas de interés:

-
- Tiempo: $e_T = (e_L)^{1/2}$ [7.6]
 - Peso: $e_P = (e_L)^3$ [7.7]
 - Caudal específico: $e_Q = (e_L)^{3/2}$ [7.8]
 - Densidad de Energía S(f): $e_{S(f)} = (e_L)^{5/2}$ [7.9]

De manera equivalente se define (entre otros números indicados precedentemente) el Número de Reynolds Re , que expresa la relación entre las fuerzas viscosas:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad [7.10]$$

En donde U es una velocidad, frecuentemente está dada por $\sqrt{gH_s}$, siendo H_s la altura significativa de la ola, D una dimensión característica del elemento y ν la viscosidad cinemática del agua.

7.3 Efectos de Escala

Como se ha indicado previamente, para garantizar la semejanza de todas las fuerzas actuantes (semejanza dinámica) entre dos sistemas, es necesario que todos los números adimensionales que representan esas relaciones de fuerzas (Froude, Reynolds, Weber, Cauchy, etc.) sean iguales en ambos sistemas, condición imposible satisfacer simultáneamente, salvo que el modelo y el prototipo estén en la misma escala geométrica.

En caso contrario (como lo es en general) deberá evaluarse cuáles son las fuerzas dominantes que representan un determinado proceso y evaluar dentro de qué límites es posible la distorsión del resto de las fuerzas, sin afectar significativamente los resultados producidos por el modelo.

En los problemas hidráulicos como el que se plantea en este estudio, las fuerzas dominantes son las de inercia y las de gravedad. Así el modelo deberá representar adecuadamente estas fuerzas y no otras. Esto implica que la ley de semejanza a considerar es la de Froude (Oumeraci, 1985).

Si la escala del modelo es muy reducida, otras fuerzas comienzan a tomar mayor importancia, particularmente las fuerzas viscosas. Pero puesto que la aceptación del número de Froude igual en modelo y prototipo impide la igualdad del número de Reynolds, la relación entre fuerzas de inercia y viscosas entre ambos sistemas se hallará distorsionada, es decir, se produce un *efecto de escala*.

En el caso de estructuras construidas con enrocado se admite que los efectos de escala producidos por la influencia de fuerzas viscosas cuando el flujo se desarrolla sobre la coraza son despreciables si el número de Reynolds (Re) es mayor que un cierto valor crítico. Se han realizado diversos estudios para determinar el valor crítico del número de Reynolds, los cuales se indican a continuación (Tirindelli et al., 2000):

Tabla 7.1 Efectos viscosos

Investigaciones realizadas	Re _{crítico}
Dai & Kamel (1969) y Kajima & Sakakiyama (1994); en ensayos con olas regulares	3×10^4
Törum (1977), Brodertick & Ahrens (1982), Mol et al. (1983) y Van der Meer (1988); con olas irregulares	$1 \times 10^4 - 4 \times 10^4$
Jensen & Klinting (1983); en base a consideraciones teóricas	0.7×10^4

El número de Reynolds crítico puede relacionarse con la altura de ola y el peso del bloque correspondiente, de manera que es posible estimar un valor mínimo de altura de ola y peso del bloque para que los efectos viscosos sean despreciables. Dichos valores fueron estimados por Dai & Kamel (1969) para un Reynolds crítico de 3×10^4 :

$$(H_m)_{\min} = 0.10 - 0.15 \text{ m}$$

$$(W_m)_{\min} = 100 - 150 \text{ g}$$

Por lo expuesto en los párrafos anteriores, en el presente estudio para la selección de escala de los elementos en el modelo se adopta como valor mínimo admisible del número de Reynolds definido en [7.8], $Re = 3 \times 10^4$.

Para el flujo que se desarrolla dentro de la estructura porosa del rompeolas se considera que en la mayoría de los modelos es laminar, mientras que en prototipo el flujo es turbulento, o al menos en gran parte del cuerpo de la obra (Tirindelli et al., 2000). Si bien existen algunas formulaciones para corregir este efecto con un aumento del tamaño del material del núcleo del rompeolas, este efecto no puede ser corregido completamente.

Por otra parte, en modelos de Froude a escala reducida las fuerzas viscosas y la tensión superficial podrían generar efectos de escala durante la transmisión del oleaje por sobre la cresta del rompeolas. Sin embargo, estos efectos son despreciables si existe una considerable transmisión, como ocurre en estructuras de baja cresta de coronación (Tirindelli et al., 2000). Además, la tensión superficial solo afectaría el proceso de transmisión y rotura de la ola si la longitud y período de ola toma valores menores a 0.5 m y 0.5 s respectivamente.

7.4 Selección de la escala

El criterio seguido para adoptar la escala, fue en base a las dimensiones del canal, la máxima ola posible de generar y las consideraciones indicadas en el punto 7.3. **Efectos de escala.**

La escala de longitudes que resultó de dicho análisis fue: $E_L=22$

La **Tabla 7.2** muestra las relaciones de escala resultantes y los valores de ola según las condiciones hidrodinámicas prevista en el diseño de la obra.

Tabla 7.2: Escala del modelo y parámetros hidrodinámicos en prototipo y modelo

Escala								
	e_L	e_t	e_w					
	22	4.69	10648					
	prototipo				modelo			
	Hs (m)	Tp (s)	prof (m)	L (m)	Hs (m)	Tp (s)	prof (m)	L (m)
Condición máxima	4.0	8.00	7.2	62.1	0.18	1.71	0.33	2.82
Condición media	3.0	7.14	5.0	46.7	0.14	1.52	0.23	2.12
Condición mínima	2.0	6.00	4.0	34.8	0.09	1.28	0.18	1.58

En la **Tabla 7.2** se observa que los valores en modelo de la longitud y el período de la ola son mayores a 0.5 m y 0.5 s respectivamente, con lo cual los efectos de escala producidos por la tensión superficial son despreciables (ver párrafo 7.3 Efectos de escala).

7.5 Estructura del rompeolas

En la **Tabla 7.3** se muestran los valores resultantes en modelo, del tamaño medio de las piedras para la coraza exterior, interior, núcleo y pie de la obra. En la **Figura 7.1** se muestra el modelo construido en el presente estudio.

Tabla 7.3: Escala del modelo para las diferentes capas del Rompeolas

capa	W_{n50} (g)	D_{n50} (cm)	Re
1	422.6	5.5	63121
2	56.3	2.8	32247
3	112.7	3.5	40628
4	140.9	3.8	43766

En la **Tabla 7.3** se observa que el número de Reynolds es considerablemente mayor que el valor límite adoptado. Por tanto los efectos de escala debidos a la viscosidad en la coraza de enrocado podrían considerarse despreciables. En el Anexo I se presentan las distribuciones de los pesos de las piedras de las principales capas, resultantes de la selección de material con el cual se construirá el modelo.

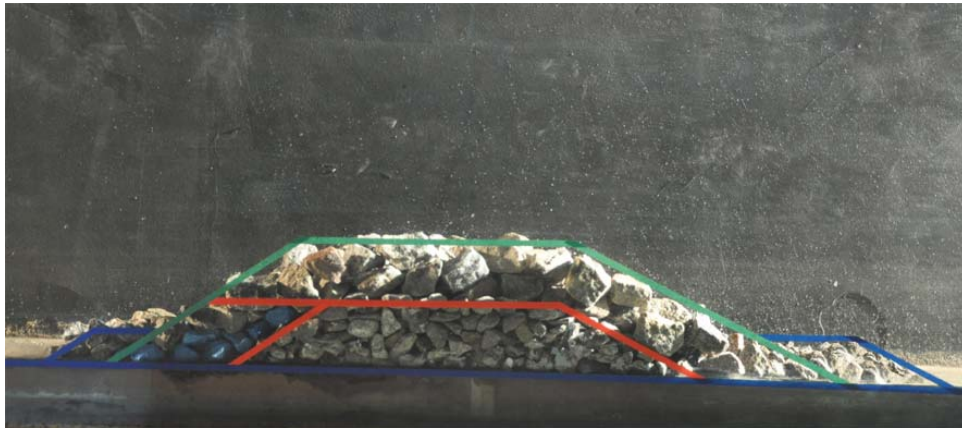


Figura 7.1: Modelo construido del rompeolas de baja cresta

7.6 Metodología de ensayo

El procedimiento metodológico consistió en evaluar el comportamiento hidráulico y estructural de la obra por medio de escalones crecientes de altura de ola (incluyendo el valor de diseño) durante un cierto tiempo.

Para el caso de ensayos que evaluaron la transmisión del oleaje, al cabo de la duración adoptada del ensayo se determinó por medio de los dos grupos de sondas la altura de ola delante y detrás del rompeolas de baja cresta. Luego se calculó el coeficiente de transmisión K_t como la relación entre la altura de ola incidente y la altura de ola detrás de la estructura.

Para los ensayos de estabilidad también se evaluaron escalones de altura de ola creciente hasta los valores de diseño. La duración de este tipo de ensayos para protecciones de enrocado influye en el daño final resultante. Van der Meer et al. (1990) observó que tormentas de gran duración causan mayor nivel de daño (con oleaje irregular existe mayor probabilidad de que ocurran olas individuales de alturas extraordinarias, que son las responsables del progreso del daño en la coraza). Este comportamiento tiene una duración límite para la cual si no ocurre el movimiento de elementos de la coraza, es poco probable que algún desplazamiento se produzca al continuar el ensayo con las mismas condiciones de oleaje.

Con estas consideraciones el autor citado recomienda ensayar entre 2000 – 3000 olas para la evaluación de la estabilidad. Una vez alcanzada dicha duración en el modelo se detiene el ensayo y se releva el perfil de la obra para determinar posibles daños.

Todos los resultados de los ensayos fueron volcados en gráficos que muestran la relación entre las distintas variables experimentales determinadas, y permitieron además su comparación con modelos empíricos de distintos investigadores. En la **Figura 7.2** se muestra el oleaje resultante para un ensayo típico.

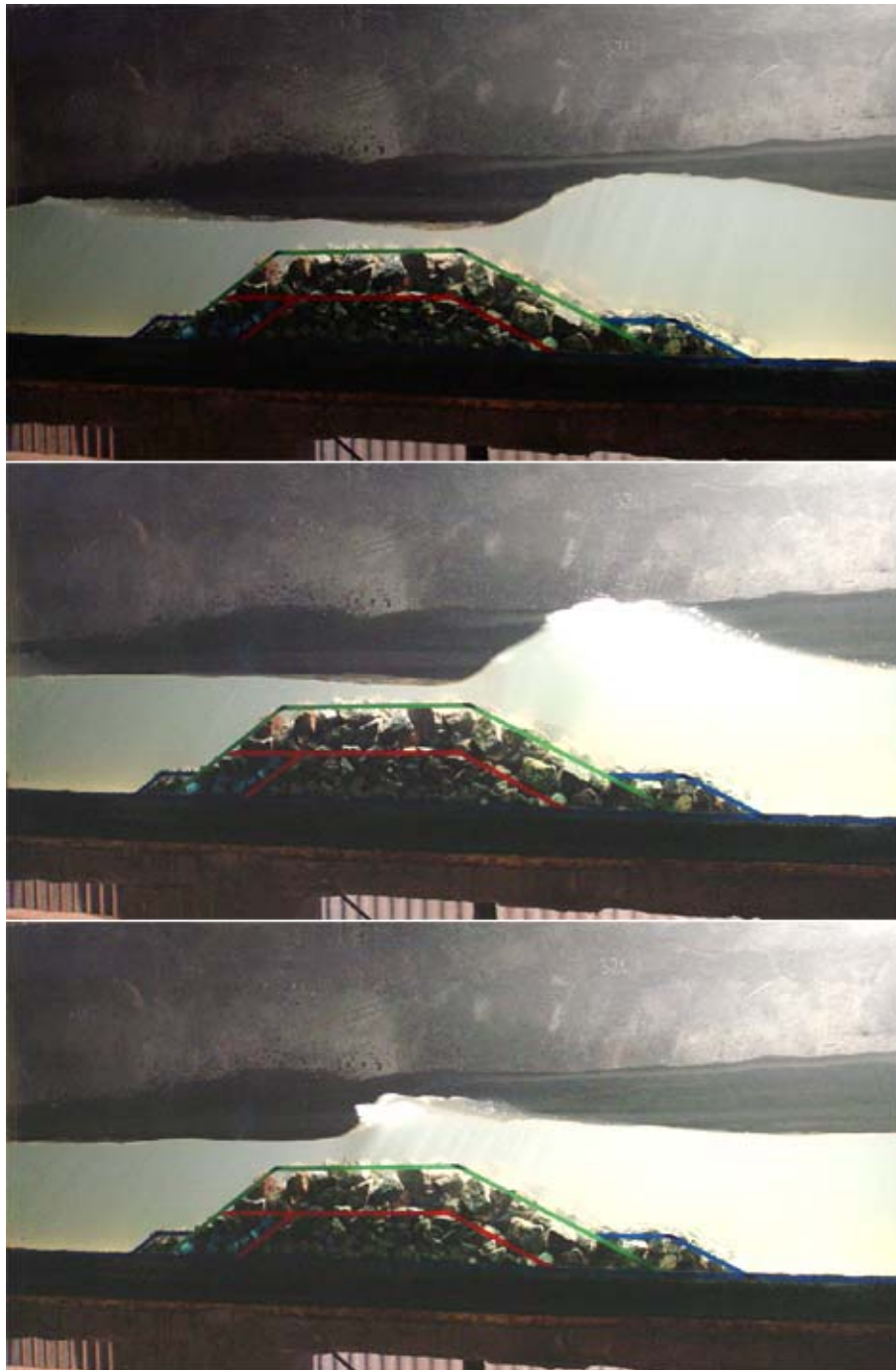


Figura 7.2: Oleaje resultante en un ensayo típico en el canal de olas

8 RESULTADOS

8.1 Transmisión del oleaje

Se realizaron 12 ensayos en total correspondientes a la sección transversal de diseño, en los cuales se cubrió un amplio rango de alturas de ola, períodos y niveles de agua según los escenarios de proyecto provistos por el cliente. En todos los ensayos se determinó la transmisión del oleaje y se obtuvieron 53 pares de valores que relacionan la altura de ola relativa a la sumergencia del rompeolas con el coeficiente de transmisión.

En la **Figura 8.1** se presentan los resultados obtenidos. En la misma se observa que a pesar de que algunos pocos puntos en la zona emergente se encuentran fuera de los límites de las curvas empíricas o sobre la misma, la concordancia entre el modelo físico y las curvas de transmisión del oleaje es muy buena.

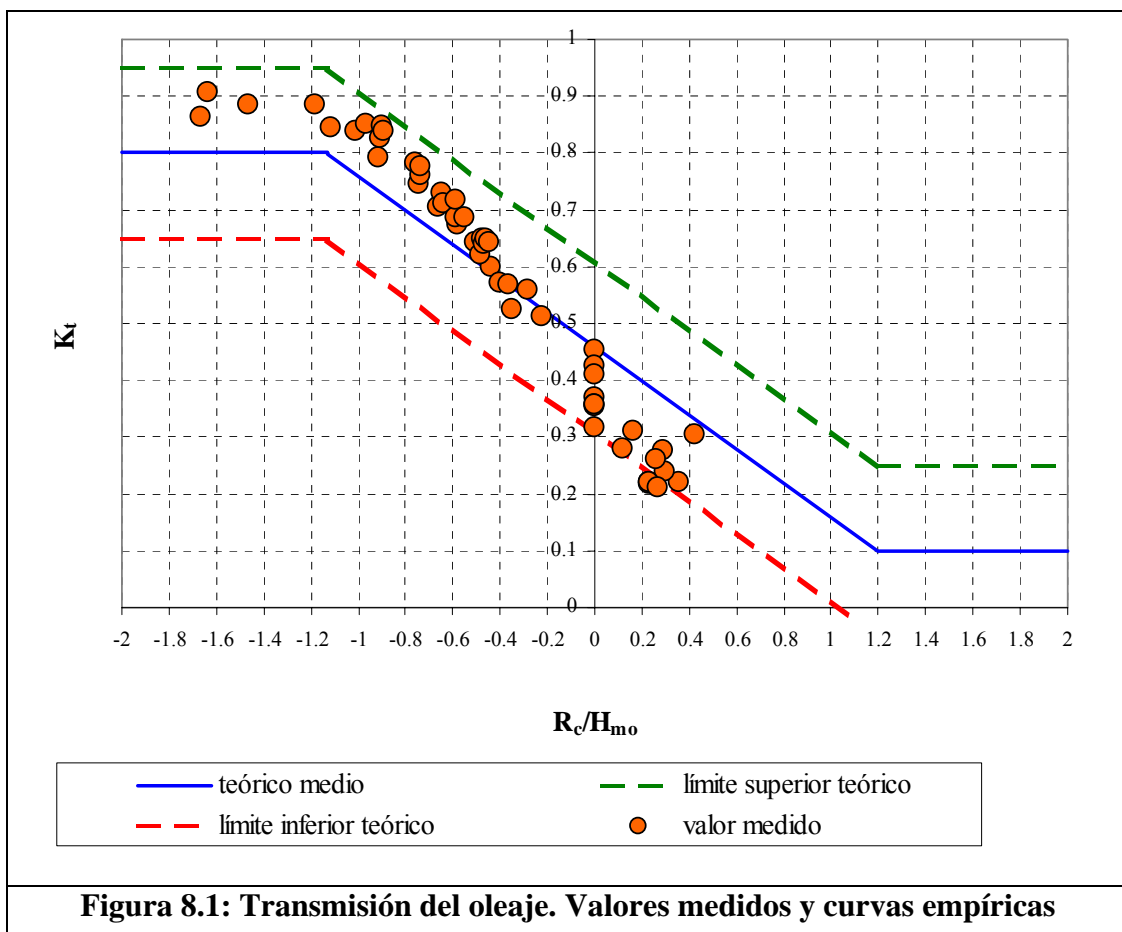


Figura 8.1: Transmisión del oleaje. Valores medidos y curvas empíricas

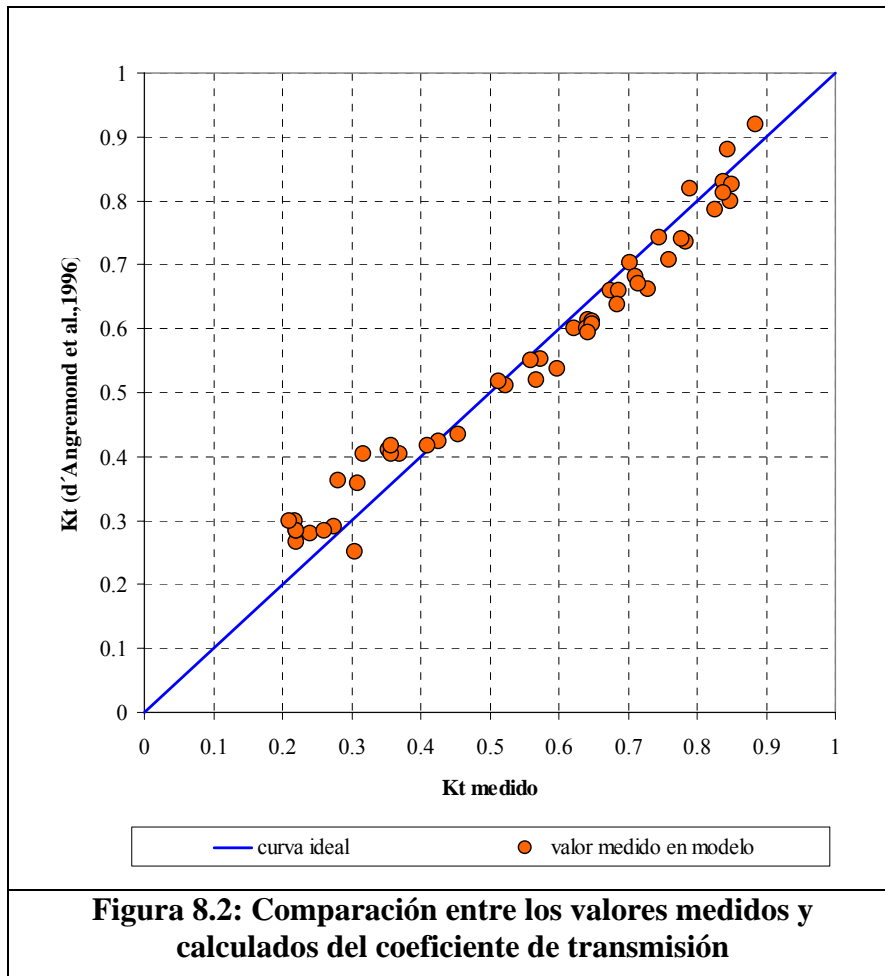
Asimismo, se observa en la curva una leve dispersión de los valores medidos respecto a la curva media propuesta por la fórmula empírica, pero en general la mayoría de los

puntos se encuentran entre los límites presentados en el párrafo **5.1 Transmisión del oleaje**. En particular se observa un incremento de la pendiente de la curva, que en la formulación teórica es -0,3 y en el presente estudio resultó aproximadamente -0.45.

Las diferencias entre la formulación empírica y los valores medidos podrían ser consecuencia de las distintas configuraciones de obra ensayadas. En efecto, los ensayos que generaron la expresión [5.2] ya poseen gran dispersión por esa causa.

En particular para la obra ensayada en este estudio, la gran permeabilidad que posee debido al tamaño del enrocado afectó probablemente el coeficiente de transmisión. En efecto, para mayor nivel de agua (valores de R_c/H_i negativos, condición sumergida), la transmisión observada fue levemente mayor a la curva media propuesta, lo cual implicaría una mayor transmisión por la mayor permeabilidad. Mientras que para valores bajos de nivel de agua (R_c/H_i cercanos a cero y positivos, condición emergente), la fricción provocaría una reducción de la energía del oleaje y por consiguiente valores de K_t levemente menores a la curva media como muestra la **Figura 8.1**.

En la ecuación [5.3] se presentó una relación más completa para determinar la transmisión del oleaje, que tiene en cuenta la permeabilidad de la obra a través del coeficiente C . En el presente estudio se ajustó el valor del coeficiente C a partir de los valores de K_t y la relación H_i/D_n50 . En la **Figura 8.2** se presenta la comparación entre los valores medidos y calculados con la formulación citada, la cual posee una correlación del 96%.



8.2 Transmisión en modelo físico 2D a gran escala

En el marco del proyecto europeo DELOS se realizó un estudio en modelo físico a gran escala en el canal de olas (CIEM) del Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) en Barcelona, España (Vidal et al., 2003). El canal de olas tiene una longitud de 100 m, 3m de ancho y 5 m de profundidad.

Los ensayos tuvieron por objetivo evaluar el comportamiento hidrodinámico de un rompeolas de baja cresta constituido por un núcleo y coraza exterior de enrocado. Los ensayos fueron realizados a fondo fijo. En la **Figura 8.3** se presentan imágenes del modelo e instalaciones disponibles en el LIM.



Figura 8.3 Modelo a gran escala e instalaciones del canal de olas del LIM de la UPC, España (Vidal et al., 2003).

En el modelo a gran escala se evaluaron dos configuraciones de obra, con distinto ancho de coronamiento. En ambas secciones el tamaño del enrocado de la coraza fue: $W_{n50} = 3360g$, $D_{50} = 10.8cm$; y diámetro del núcleo fue: $D = 20/40mm$. Es importante señalar que esta configuración presenta una menor permeabilidad que la ensayada en el presente estudio debido a que solo posee un núcleo de material granular de pequeño tamaño y una coraza externa.

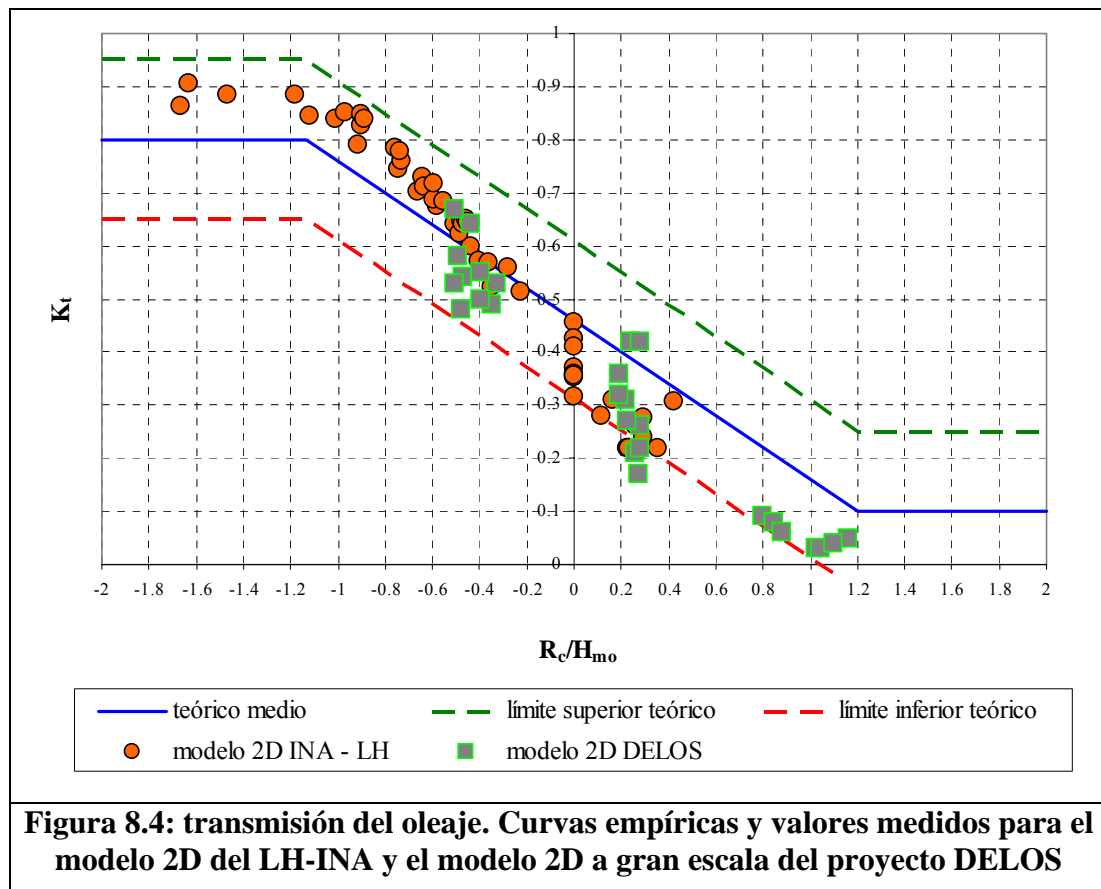
En la **Figura 8.4** se presenta la comparación entre los resultados experimentales del presente estudio y el modelo a gran escala. Se observa que, si bien los resultados del proyecto DELOS poseen mayor dispersión, existe una buena concordancia entre los dos modelos. Para la *condición sumergida* en el rango ensayado coincidente ($-0.5 < R_c/H_i < -0.2$) el valor promedio del coeficiente de transmisión en el modelo de DELOS es *menor* a del presente estudio.

Esta diferencia podría ser debida a los efectos que provoca la permeabilidad sobre la transmisión del oleaje como se comentó en el parágrafo **8.1 Transmisión del oleaje**. En efecto, se observó anteriormente que para la condición sumergida la permeabilidad juega un rol importante, y dado que el modelo ensayado en el presente estudio es más permeable, de allí la leve diferencia en los resultados.

En cambio, para la *condición emergida* en el rango ensayado coincidente ($0.12 < R_c/H_i < 0.27$) el valor promedio del coeficiente de transmisión en el modelo de DELOS es mayor al del presente estudio (10% menor aproximadamente que el modelo a gran escala).

Esta diferencia podría ser debida a los efectos que provoca la fricción sobre la transmisión del oleaje como se comentó en el parágrafo **8.1 Transmisión del oleaje**. Además en el modelo a escala reducida la fricción podría estar afectada por efectos de escala relacionados con el flujo dentro de la estructura (ver apartado **7.3 Efectos de escala**) con lo cual aumenta la resistencia y disminuye la transmisión.

De esta manera, el análisis comparativo realizado permite disminuir las incertidumbres de los resultados obtenidos en el modelo en escala reducida del presente estudio, sobre todo en lo relativo a efectos de laboratorio y efectos de escala.



8.3 Transmisión en modelo físico 3D

También en el marco del proyecto europeo DELOS se desarrolló un estudio en modelo físico 3D para evaluar diversos aspectos del comportamiento de rompeolas de baja cresta (Kramer et al., 2003). En las **Figuras 8.5 a 8.8** se presentan la configuración del modelo, las instalaciones y dimensiones ensayados en el estudio citado.

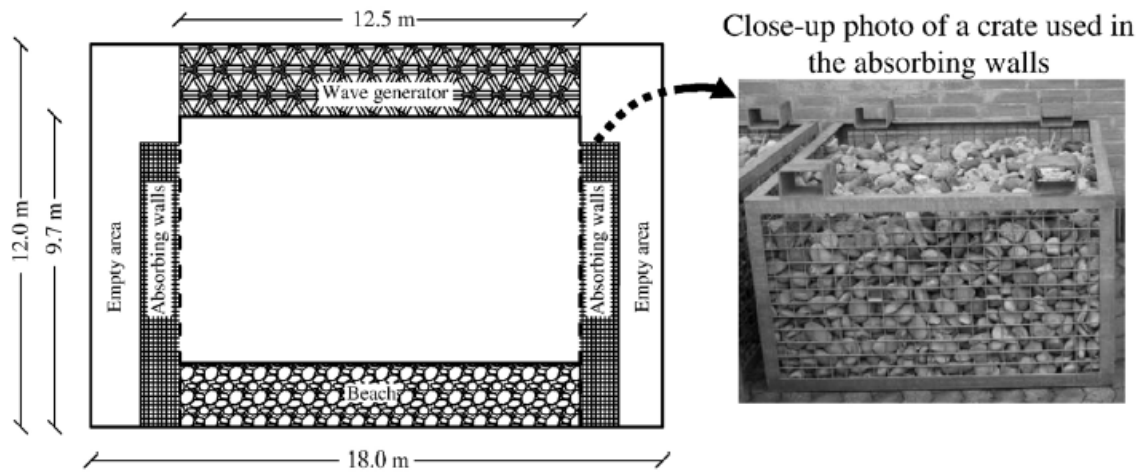


Figura 8.5: Esquema del cuenco de olas 3D en el laboratorio de la Universidad de Aalborg, Dinamarca (Kramer et al., 2003).

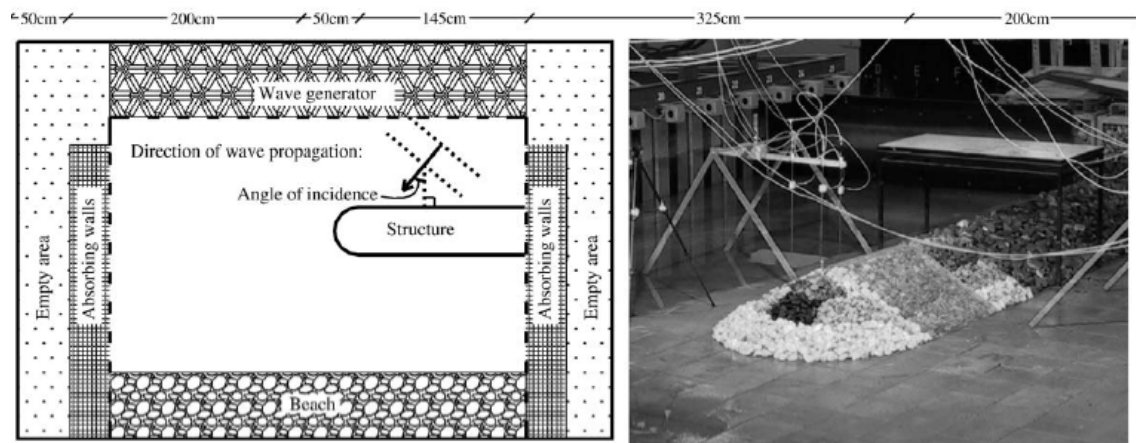
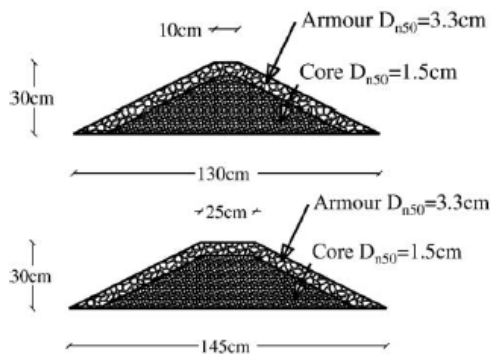


Figura 8.6: Cuenco de olas y modelo 3D del rompeolas de baja cresta en el laboratorio de la Universidad de Aalborg, Dinamarca (Kramer et al., 2003).



Parameter	Value
Crest width	$3D_{n50}$ and $8D_{n50}$
Crest height H_c	0.30m
Structure slope	1V : 2H
Freeboards R_c	-0.10, -0.05, 0.0 and 0.05m
Armour	$D_{n50}=0.033m$
Core	$D_{n50}=0.015m$
Armour layer thickness: $0.066m$ ($2D_{n50}$)	

Figura 8.7: Geometría de la obra modelada y rango de los parámetros utilizados en el laboratorio de la Universidad de Aalborg, Dinamarca (Kramer et al., 2003).



Figura 8.8: Modelo del rompeolas de baja cresta en el laboratorio de la Universidad de Aalborg, Dinamarca (Kramer et al., 2003).

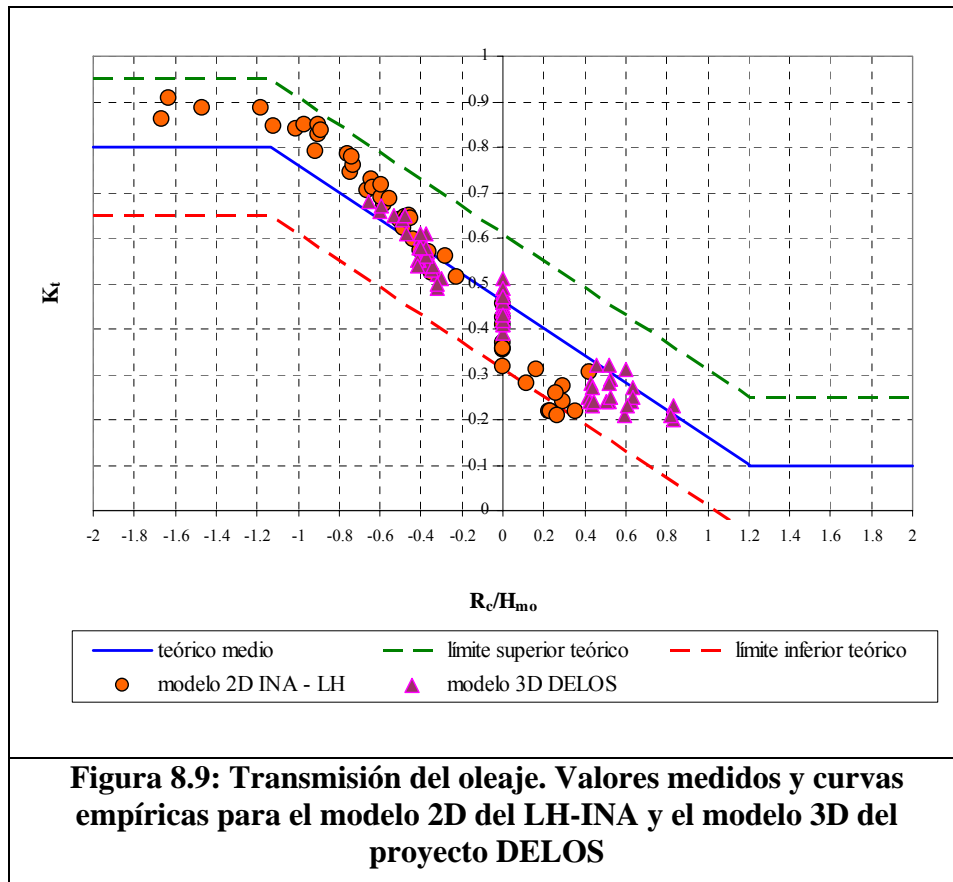
Entre otros aspectos, el estudio en modelo físico 3D tuvo por objetivo determinar la influencia del ángulo de incidencia del oleaje sobre el coeficiente de transmisión. Las conclusiones obtenidas del estudio fueron (Van der Meer et al. 2004):

- El ángulo de transmisión se reduce al 80% del incidente: $\beta_t = 0.8 \beta_i$
- El valor del coeficiente K_t no varía significativamente para ángulos de incidencia menores a 60° .

En la **Figura 8.9** se presenta una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio y la modelación 3D del proyecto DELOS. A pesar de las diferencias lógicas de resultados debido a que las configuraciones ensayas no son iguales, se observa buena concordancia entre ambos modelo para la condición sumergida.

Para la condición emergente y con la cota de coronamiento coincidente con nivel del agua las diferencias son mayores. En efecto, el valor del coeficiente de transmisión es considerablemente menor en la modelación física 2D (30 % menor en promedio).

Esta diferencia podría ser a causa de la mayor cantidad relativa de energía que ingresa entre las aperturas del sistema de rompeolas paralelo respecto de la que ingresa por sobrepaso de su cresta. Es decir, cuando el oleaje incide sobre este sistema de protección, la energía que llega detrás de los rompeolas se debe a la transmisión del oleaje sobre el coronamiento, a través de la estructura porosa y en forma indirecta por difracción cuando las olas pasan entre las aperturas. En el modelo 2D no puede evaluarse la energía que ingresa entre rompeolas y se difracta en los morros. Este fenómeno toma mayor influencia sobre el coeficiente de transmisión en caso de rompeolas emergentes o con francobordo nulo, ya que a medida que aumenta la condición emergente la única energía que ingresa es entre los rompeolas.



8.4 Variación del Período del oleaje

El coeficiente de transmisión solo contiene información acerca de la altura de ola detrás de la estructura. El espectro de energía es el que contiene información sobre la altura de ola y el período del oleaje. Esta información es requerida por ejemplo para el estudio de cambios morfológicos.

El espectro de energía transmitido es frecuentemente diferente al espectro incidente. En el trabajo realizado por van der Meer et al. (2000) se indica que el período pico incidente y transmitido aproximadamente iguales. No obstante, la distribución de energía en función de la frecuencia es distinta en el espectro incidente y transmitido. En el espectro de energía transmitido generalmente existen olas en la zona de mayor frecuencia, es decir de menor período de ola.

Van der Meer et al. (2000) a partir de sus resultados experimentales proponen un método para estimar la distribución de energía en el espectro transmitido. En la Figura 8.10 se muestra el espectro propuesto por los autores para un ejemplo de distribución de frecuencia. Según este método el 40% de la energía transmitida se encuentra en frecuencias mayores a 1.5 veces la frecuencia pico, f_p .

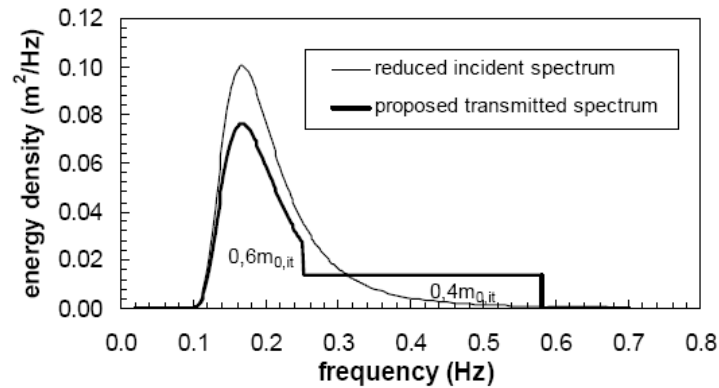


Figura 8.10: Espectro incidente y espectro transmitido para el método propuesto (van der Meer, 2000)

En la Figura 8.11 se muestra un ejemplo de un ensayo del presente estudio con su espectro de energía incidente y transmitido. Allí se observa que la frecuencia pico incidente y transmitida son coincidentes, mientras que la energía del oleaje aparece mayor distribuida en el espectro transmitido. En efecto, el espectro transmitido presenta un segundo máximo de energía para una frecuencia 1.3 veces la frecuencia pico.

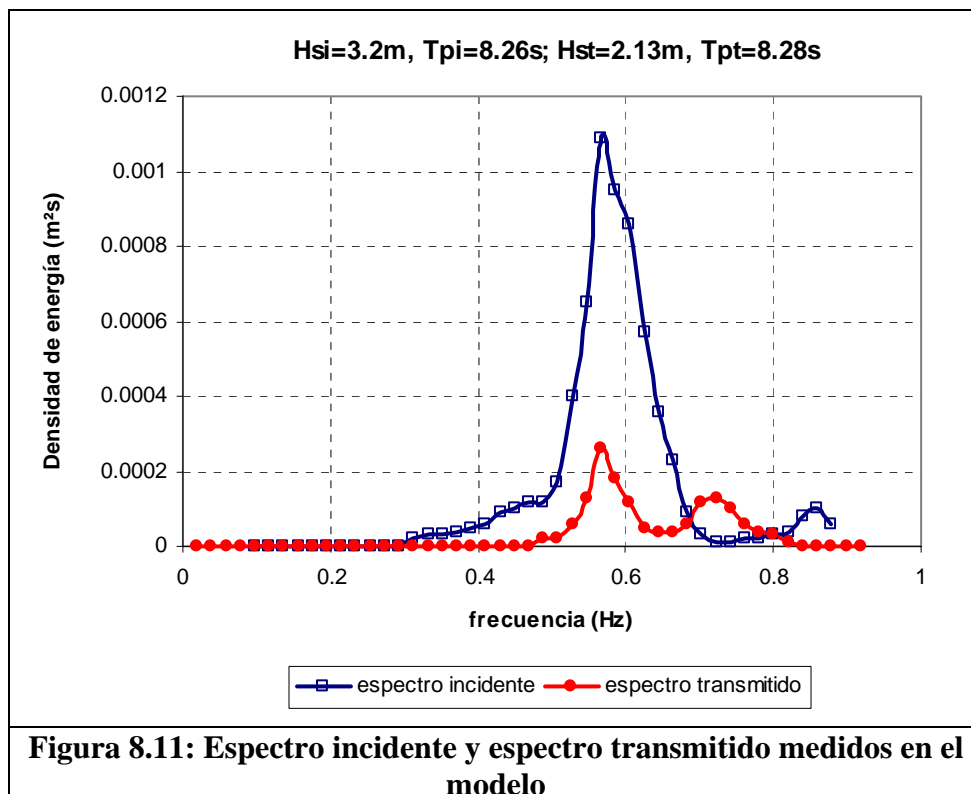


Figura 8.11: Espectro incidente y espectro transmitido medidos en el modelo

8.5 Estabilidad

De los 12 ensayos realizados, en 6 ellos se evaluó la estabilidad de la obra. Específicamente se estudió el comportamiento de la coraza de protección externa y el pie de la obra. Para ello en cada escenario se observó la estabilidad por comparación del perfil transversal inicial y final de la estructura.

Para determinar los escenarios a utilizar en el estudio de estabilidad se consideró la condición que más afecta el enrocado, la cual ocurre para niveles de mar cercanos a la cota de coronamiento de la estructura (van der Meer y Daemen, 1994). De esta manera, con las condiciones hidrodinámicas provistas por el Comitente presentadas en el Capítulo 4, y la máxima altura de ola posible de generar en el Canal del LH para niveles bajos, se ensayaron los escenarios presentados en la **Tabla 8.1**.

Tabal 8.1: Escenarios utilizados para la evaluación de la estabilidad del enrocado de protección y pie de la obra.

R _c (m)	H _s (m)	T _p (m)
0.00 (Nivel medio mar)	3.10	7.7
0.00 (Nivel medio mar)	3.40	8.3
-1.72 (Nivel de Tr = 2años)	3.70	8.3
0.70 (Bajamar más baja)	2.80	7.0
0.39 (Bajamar media)	3.00	7.0
0.00 (Nivel medio mar)	2.90	7.1

En ninguno de los escenarios evaluados se observó daño ni en el enrocado de protección, ni en el pie de la obra.

9 CONCLUSIONES

Se realizó un estudio mediante modelación física en escala reducida de la sección transversal de un rompeolas de baja cota de coronación. Se evaluó el comportamiento hidráulico y estructural de la obra. Los aspectos básicos estudiados fueron la transmisión del oleaje sobre y a través de una sección del rompeolas, y la estabilidad de la coraza y el pie de protección.

Se realizaron 12 ensayos en total en los cuales se cubrió un amplio rango de alturas de ola, períodos y niveles de agua según los escenarios de proyecto provistos por el cliente. En todos los ensayos se determinó la transmisión del oleaje y en 6 ellos se evaluó la estabilidad de la obra. Las principales conclusiones obtenidas son:

- En cuanto a la transmisión del oleaje, pudo establecerse una muy buena concordancia con otros resultados experimentales incluyendo modelos físicos 2D a gran escala y modelos 3D.
- A medida que la sumergencia de la estructura aumenta, la atenuación de la altura del oleaje disminuye linealmente con la misma. Esto implica que la eficiencia de la estructura en cuanto a la protección de la playa y pie del acantilado será más reducida para escenarios con niveles de mar afectados por condiciones meteorológicas severas.
- Cuando la estructura funciona como emergente o emergida ($R_c/H_s \geq 0$) los efectos tridimensionales (no analizados en este modelo físico) comienzan a resultar significativos. Por eso la altura del oleaje detrás de la estructura en el modelo 3D resulta mayor a los obtenidos en presente estudio, debido a la energía adicional aportada desde los extremos de los rompeolas por los efectos de difracción.
- No se observó daño sobre la coraza de enrocado, ni en el pie de la obra para la condiciones de diseño.

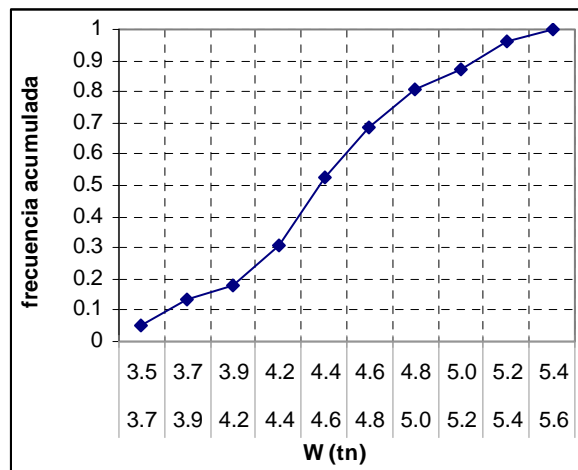
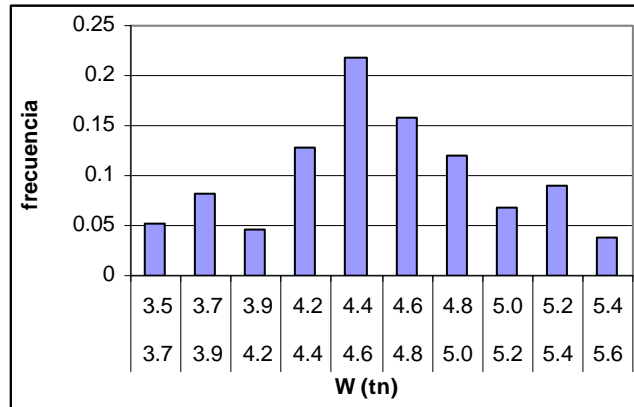
10 REFERENCIAS

- Córdova, L. (1999).** "Estudio del fenómeno del rebase en obras de defensa de costas para las condiciones de Cuba." Tesis Doctoral.
- d'Angremond K., J.W. van der Meer and R.J. de Jong (1996).** Wave transmission at low crested structures. Proc. 25th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE, 3305-3318.
- Kramer, M. y Burcharth, H. (2002).** Wave basin experiment final form. 3D stability test at AAU. DELOS deliverable 31. available from the Internet www.delos.unibo.it.
- Kramer, M., Zanuttigh, B., Baoxing, W., Van der Meer, J.W., Lamberti, A., Burcharth, H.F., (2003).** Wave basin experiments. Internal report, DELOS deliverable D31, available from the Internet www.delos.unibo.it.
- Oumeraci, H (1985).** Scale Effects in Coastal Hydraulic Models - Laboratoire d'Etudes Maritimes, Algier, Algeria – International Conference of Scale Effects. IAHR
- Tirindelli y Lamberti (University of Bologna); Paphitis y Collins (University of Southampton); Cesar Vidal (University of Cantabria); Hawkins y Paula Moschella (MBA); Burchart (Aalborg University); Agustin Sanchez-Arcilla (Politecnical University of Catalonia). (2000).** Wave Action on Rubble Mound Breakwater: The Problem of Scale Effects. DELOS EVK3-CT-2000-00041, available from the Internet www.delos.unibo.it
- van der Meer, J. W. (1990)** Rubble Mounds – Recent modifications , Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Vol. 1.
- van der Meer, J. W. (1990a).** Data on wave transmission due to overtopping. Delf Hydraulics report N° H986.
- van der Meer, J. W. (1990b).** Low crested and reef breakwaters. Delf Hydraulics report N° H986 II.
- van der Meer, J. W. y Daemen, I. F. R. (1994).** Stability and wave transmission at low crested rubble-mound structures". J. of waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering, 1, 1-19.
- van der Meer; Regeling, E. y de Waal J. P. (2000).** Wave transmission: spectral changes and its effects on run-up and overtopping. Proc. 27th ICCE, Sidney, ASCE, pp. 2156-2168.
- van der Meer, J.W., Briganti, R., Wang, B. and Zanuttigh, B. (2004).** "Wave transmission at low-crested structures including oblique wave attack", Proc.29th Int. Conf. on Coastal Engineering, ASCE.
- Vidal, C., Gironella, X., (2003).** Wave channel experiments. Internal report, DELOS deliverable D32, available from the Internet www.delos.unibo.it.

ANEXO I

DISTRIBUCIÓN DE PESOS DE LAS DIFERENTES CAPAS DEL ROMPEOLAS

CORAZA EXTERNA (valores en prototipo)

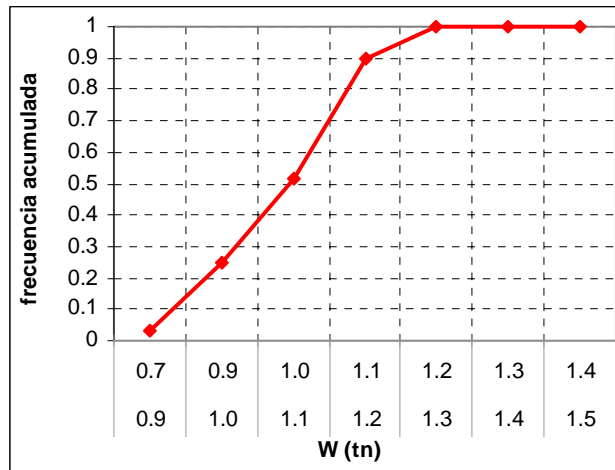


$$W_{\min} = 3.5\text{tn}$$

$$W_{50} = 4.5\text{tn}$$

$$W_{\max} = 5.5\text{tn}$$

PIE (valores en prototipo)



CORAZA INTERNA (valores en prototipo)

