

TESIS DOCTORAL

Análisis y Estimación de la Reflexión del Oleaje en
Estructuras Marítimas Antirreflejantes tipo Jarlan

AUTOR

Joaquín de María Garrido Checa

DIRIGIDA POR

Dr. Josep R. Medina Folgado



Noviembre de 2011

A Amparo y María

Agradecimientos

Tras varios años de perseverancia, estudio y trabajo, presento esta Tesis Doctoral, no por el único mérito personal, sino también por el apoyo, la colaboración y el asesoramiento de numerosas personas a las que agradezco el haber podido llegar a este momento.

A Amparo y María, de quienes he recibido ánimo, comprensión y apoyo en cada momento, y en compensación por el tiempo que no les he dedicado.

A mi padre, en el año de su muerte, de quien he aprendido a vivir con inquietud por el conocimiento de todo lo que nos rodea, a ser constante y a perseverar hasta conseguirlo.

A mi madre y mis hermanos.

A mis compañeros de trabajo en el Laboratorio de Puertos y Costas, Jose Alberto, Pepe, Miguel y Esther.

A Josep, director de la Tesis Doctoral, por la formación académica e investigadora recibida, por su disponibilidad y consejo.

Resumen

La Tesis Doctoral que se presenta ofrece como resultado de la investigación realizada nuevas fórmulas para la estimación de la reflexión del oleaje en estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan (ARJ), aplicables tanto a estructuras de una sola cámara perforada, como a estructuras de doble cámara perforada, sometidas a la acción de oleaje regular y de oleaje irregular.

A tenor de la revisión de la literatura existente, la presente Tesis Doctoral se centra en el aporte de un modelo semiempírico de aplicación sencilla que, estando fundamentado en los principios teóricos de la teoría del potencial de flujo, tenga en cuenta las componentes no lineales del fenómeno de disipación del oleaje en este tipo de estructuras marítimas ARJ.

Las nuevas formulaciones se validan tomando como base los 1800 ensayos de oleaje regular y 160 ensayos de oleaje irregular realizados en LPC-UPV para los proyectos "Estudio de muelles y diques verticales antirreflejantes: MUDIVAR" (2002-2005) y "Estudio del rebase y la estabilidad de diques verticales antirreflejantes: REDIVAR" (2007-2009); así como, de los resultados de los proyectos "Estudio de muelles de cajones antirreflejantes: MUCAR" (2008-2010) y "Diseño y adaptabilidad de Cajoneros convencionales para la construcción de Diques y Muelles Antirreflejantes: CADIMA" (2008-2011), en la que se consideran diferentes tipologías ARJ, con diferentes porosidades de cámara.

Los resultados obtenidos de estos ensayos muestran, en consonancia con otros autores que han realizado experimentos similares, que en estructuras tipo

ARJ, el valor del Coeficiente de Reflexión (CR) depende del ancho relativo de la cámara (B/L), pero esta variable no explica por sí sola los resultados observados de CR.

Las variables estructurales que se han tenido en cuenta en los experimentos y que, además de la variable B/L, pueden influir en el CR obtenido son el tipo de abertura de las paredes, la porosidad y el número de cámaras. En cuanto a las variables climáticas, además de la longitud de onda, otras variables como la altura de ola han de ser consideradas para explicar el fenómeno de la reflexión en este tipo de estructuras.

En todos los casos se observa que la porosidad tiene una importante influencia en la variación del CR; sin embargo, es difícil detectar a priori de qué manera influye junto con el resto de variables que intervienen en el fenómeno y que hacen que exista una importante dispersión de las estimaciones de CR dependiente sólo del ancho relativo, B/L.

Los modelos analíticos de estimación del CR en estructura ARJ de una y dos cámaras propuestos por Fugazza y Natale (FNO) y Williams et al. (W0) han servido de base para analizar la bondad del ajuste y han sido mejorados modificándolos con fórmulas empíricas concretas para obtener un mejor ajuste a los resultados experimentales. El modelo FNO ha sido seleccionado por englobar el fundamento básico teórico del fenómeno de la reflexión del oleaje sobre estructuras marítimas ARJ, y el modelo W0, por tratarse de un modelo que, basado en el mismo fundamento de flujo potencial que el modelo de FNO, introduce el término de disipación del oleaje por amortiguamiento dentro de la cámara.

La comparación entre los resultados de ambos modelos modificados empíricamente muestra que el ajuste es mejor con el modelo de Fugazza modificado (FN1), aunque no es todo lo bueno que se desearía. Por esta razón, la aplicación de técnicas de redes neuronales podadas con estrategias evolutivas ha abierto un nuevo campo de investigación para resolver este tipo de limitación, ya que es capaz de encontrar esas relaciones no lineales entre las variables y además permite conocer qué variables de entrada son las que más influyen en el resultado final. Esta habilidad que tienen las redes neuronales podadas mediante estrategias evolutivas, unida a que se toma como variable fundamental el resultado de estimar la proporción de energía reflejada ($RE=CR2$) a partir del modelo analítico de FN1, que es el que ha mostrado ofrecer mejores ajustes tanto en tipologías de ARJ de una cámara como en tipologías de ARJ de dos cámara, facilitan de forma determinante la formulación sencilla de las relaciones con las que el modelo ha sido capaz de encontrar un buen ajuste a los datos experimentales.

Como resultado de aplicar esta metodología se ha obtenido una relación sencilla de formular entre la porosidad y la energía reflejada estimada mediante modelo FN1. La nueva fórmula semiempírica validada para oleaje regular e irregular sobre estructuras ARJ de una y dos cámaras permite obtener estimaciones de la energía de onda reflejada con un porcentaje de error cuadrático medio relativo (rMSE) inferior al 35% para todas las observaciones experimentales utilizadas en la Tesis Doctoral, siendo especialmente preciso (rMSE < 10%) para el caso de estructuras de doble cámara perforada y oleaje irregular, el más común en el diseño de este tipo de estructuras.

Cuando se compara con los datos experimentales de otros autores, el nuevo modelo ofrece una estimación del coeficiente de reflexión (CR) con errores similares para oleaje regular y ligeramente superiores (RMSE <13,5%) para oleaje irregular. Por lo que se puede afirmar que la nueva formulación es buena para la estimación del oleaje reflejado en estructuras ARJ de una y dos cámaras, tanto para oleaje regular como de oleaje irregular.

Abstract

The present Doctoral Thesis proposes new formulas to estimate the coefficient of reflection for single- and double-perforated chambers in Jarlan-type breakwaters valid for regular and random waves.

After having carried out a review of state of art, it has been necessary to obtain a new model based on an expanded experimental data base. This semi-empirical model is based on a potential flow theoretical model which was modified with specific empirical formulas to take into account the nonlinear relationships between the structural and wave climate parameters and the Jarlan-type breakwater reflectivity.

The new formulas were tested with 1500 regular wave and 160 random wave runs conducted at the Laboratory of Ports and Coasts of *Universidad Politécnica de Valencia* (LPC-UPV) during research projects "Study of perforated caisson for quay walls and vertical breakwaters: MUDIVAR" (2002-2005) and "Study of overtopping and stability of low reflectivity vertical breakwaters: REDIVAR" (2007-2009); as well as, by the results of project "Study of perforated caisson for quay walls: MUCAR" (2008-2010) and "Design and adaptability of caisson production facility for low reflectivity vertical breakwaters and quay walls: CADIMA" (2008-2011), which are considered different JTB typologies with different porosities.

Perforated wall typology, porosity and the number of chambers are structural variables were taken into account in the experiments. In addition to the wavelength, other climate variables, such as wave height, must be considered to explain the phenomenon of reflection in JTB. The results of these tests show,

consistent with other authors who have performed similar experiments, that the Reflection Coefficient (CR) on JTB depends on the relative width of the perforated chamber (B/L), but wide dispersion of estimated CR shows that this variable is not sufficient to explain the observed results of CR. In the other hand, it has been observed that the porosity has a significant influence on the variation of the CR, however, it is difficult to know what is their relationship with the rest of variables.

Analytical models proposed by Fugazza and Natale (FN0) and Williams et al. (W0) was modified for single- and double-chamber JTBs to improved the agreement with experimental observations for both FN0 and W0 models. FN0 model included the basic theoretical foundation of the phenomenon of wave reflection on JTBs, and W0 model introduces the wave dissipation term by damping within the chamber.

The comparison between the results of both empirically modified models shows that the fit is better with the Fugazza model modified (FN1). However, the disagreement between certain experimental observations and the estimation of Reflected Energy (RE) by the FN1 and W1 models show high errors. Pruned Neural Network (NN) models with Evolutionary Strategies (ES) were used to identify an explicit empirical modification of the FN1 model for a better agreement with the experimental data. The ESs have proved to be very effective optimizing both the topology and parameters of pruned NN models, facilitating the process of finding the relationships captured by the NN models. Thus, the new formulas are similar to those of the NN model, but the obtained equations are explicit and therefore more robust and easier to use than the NN models.

Numerical simulations and graphic representations facilitated the search for simple empirical equations to modify FN1. As a result, an empirical

relationship between wall porosities and RE or CR was found to significantly improve the FN1 model. The new semi-empirical model provides an estimation of RE with a low relative MSE; $r_{MSE} < 35\%$ for regular wave tests and $r_{MSE} < 10\%$ for random wave tests and double chamber JTb.

When compared with experimental data given by other authors, the new model provides an estimation of the reflection coefficient (CR) errors were similar for regular wave tests and slightly higher ($r_{MSE} < 13.5\%$) for random wave tests. Therefore, it can be stated that this semi-empirical model provides good estimations for single- and double-chamber JTbs under regular as well as random waves.

Resum

La Tesi doctoral que es presenta, ofereix com resultat de la investigació realitzada, noves fórmules per a l'estimació de la reflexió de l'onatge en estructures marítimes antireflectors de tipologia Jarlan (ARJ), aplicables tant a estructures d'una sola càmera perforada, com a estructures de doble càmera perforada, sotmeses a l'acció de l'onatge regular i de l'onatge irregular.

D'acord amb la revisió de la literatura existent, la present Tesi Doctoral es centra en l'aportació d'un model semiempíric d'aplicació senzilla que, estant fonamentat en els principis teòrics de la teoria del potencial de flux, tinga en compte les components no lineals del fenomen de dissipació de l'onatge en aquesta tipologia d'estructures marítimes ARJ.

Les noves formulacions es validen prenent com a base els 1800 assaigs d'onatge regular i 160 assaigs d'onatge irregular, realitzats al Laboratori de Ports i Costes de la Universitat Politècnica de València (LPC-UPV), per als projectes "Estudi de molls i dics verticals antireflectants: MUDIVAR" (2002-2005) i "Estudi del depassi i l'estabilitat de dics verticals antireflectors: REDIVAR "(2007-2009); així com, dels resultats dels projectes" Estudi de molls de calaixos antireflectors: MUCAR "(2008-2010) i" Disseny i adaptabilitat de Calaixeres convencionals per a la construcció de Dics i Molls antireflectors: CADIMA "(2008-2011), en els què es consideren diferents tipologies ARJ, amb diferents porositats de càmera.

Els resultats obtinguts d'aquests assaigs mostren, d'acord amb altres autors que han realitzat experiments similars, que en estructures tipus ARJ el valor del Coeficient de Reflexió (CR) depèn de l'ample relatiu de la càmera (B/L) però aquesta variable no explica per si sola els resultats observats de CR.

Les variables estructurals que s'han tingut en compte en els experiments i que, a més de la variable B/L , poden influir en el CR obtingut, són el tipus d'obertura de les parets, la porositat i el nombre de càmeres. Pel que fa a les variables climàtiques, a més de la longitud d'ona, altres variables com l'alçada d'ona, han de ser considerades per explicar el fenomen de la reflexió en aquest tipus d'estructures.

En tots els casos s'observa que, la porositat té una important influència en la variació del CR, però, és difícil detectar a priori de quina manera influeix juntament amb la resta de variables que intervenen en el fenomen i que fan que haja, una important dispersió de les estimacions de CR, dependent només de l'ample relatiu, B/L .

Els models analítics d'estimació del CR en estructura ARJ d'una i dues càmeres, proposats per Fugazza i Natale (FN0) i Williams et al. (W0), han servit de base per analitzar la bondat de l'ajust i han segut millorats modificant-los amb fórmules empíriques concretes, per obtenir un millor ajust als resultats experimentals. El model FN0 ha segut seleccionat per englobar el fonament bàsic teòric del fenomen de la reflexió de l'onatge sobre estructures marítimes ARJ, i el model W0, per tractar-se d'un model que, basat en el mateix fonament de flux potencial que el model de FN0, introdueix el terme de dissipació de l'onatge per amortiment dins de la càmera.

La comparació entre els resultats dels dos models modificats empíricament ,mostra que l'ajust és millor amb el model de Fugazza modificat (FN1), encara que no és tot el bo que es desitjaria. Per aquesta raó, l'aplicació de tècniques de xarxes neuronals podades amb estratègies evolutives, ha obert un nou camp d'investigació per resoldre aquest tipus de limitació, ja que és capaç de

trobar eixes relacions no lineals entre les variables, i a més, permet conèixer quines variables d'entrada són les que més influeixen en el resultat final. Aquesta habilitat que tenen les xarxes neuronals podades mitjançant estratègies evolutives, unida al fet que es pren com a variable fonamental el resultat d'estimar la proporció d'energia reflectida ($RE = CR^2$) a partir del model analític de FN1, que és el que ha mostrat oferir millors ajustos tant en tipologies de ARJ d'una càmera, com en tipologies de ARJ de dos càmeres, faciliten de forma determinant la formulació senzilla de les relacions amb les que el model ha estat capaç de trobar un bon ajust a les dades experimentals.

Com a resultat d'aplicar aquesta metodologia, s'ha obtingut una relació senzilla de formular entre la porositat i l'energia reflectida estimada mitjançant el model FN1. La nova fórmula, validada per l'onatge regular i irregular sobre estructures ARJ d'una i dues càmeres, permet obtenir estimacions de l'energia d'ona reflectida amb un percentatge de d'error quadràtic mitjà relatiu (RMSE) inferior al 35%, per a totes les observacions experimentals utilitzades en la tesi doctoral, i és especialment necessari (RMSE <10%) per al cas d'estructures de doble càmera perforada i onatge irregular, el més comú en el disseny d'aquest tipus d'estructures.

Quan es compara amb les dades experimentals d'altres autors, el nou model ofereix una estimació del coeficient de reflexió (CR) amb errors similars per onatge regular i lleugerament superiors (RMSE <13,5%) per onatge irregular. Pel que es pot afirmar que la nova formulació és bona per a l'estimació de l'onatge reflectit en estructures ARJ d'una i dues càmeres, tant per onatge regular como d'onatge irregular.

Símbolos

Acrónimos

AR	AR o Baja reflectividad
CR	Coefficiente de Reflexión
ES	Estrategias evolutivas (“Evolutionary Strategy”, en inglés)
ep	Escala en prototipo
FNO	Modelo de Fugazza and Natale (1992)
FN1	Modelo FNO modificado
ARJ	Dique vertical tipo Jarlan
MSE	Error Cuadrático Medio (“Mean Squared Error”, en inglés)
NN	Red Neuronal
PSE	= $MSE[1+2P/(N-P)]$ = Error cuadrático predictivo
RE	= CR^2 = Energía Reflejada (%)
W0	Modelo de Williams et al. (2000)
W1	Modelo W0 modificado

Notación

α	Coefficiente de pared perforada
A_p	Área de pared perforada
A_t	Área total de la pared
β	Coefficiente de disipación lineal
B	Ancho de cámara

C	= $1-PW$ = Longitud relativa del chorro que pasa por el orificio
Cc	Coefficiente empírico de descarga de la pared perforada
D(L, B)	Función de amortiguamiento
γ	Coefficiente de amortiguamiento
g	Aceleración debida a la gravedad
h	Profundidad de agua
H	Altura de ola
Hs	= H_{m0} = Altura de ola significativa
k	Número de onda
i	= $(-1)^{1/2}$ = unidad imaginaria de números complejos
l	Longitud del chorro de fluido que atraviesa la pared perforada
L	Longitud de onda para oleaje regular
L_{01}	= m_0/m_1 = Longitud de onda media en oleaje irregular
m_k	momento espectral de k-ésimo orden
N	Número de datos de aprendizaje de la red neuronal.
p%	Porosidad de la pared
P	Número de parámetros libres de la red neuronal
Q	= lk = Parámetro adimensional de la longitud de chorro
rMSE	= $(MSE)^{1/2}$
R	Tasa de atenuación de la energía
S(f)	Espectro de onda
T	Periodo de ola para oleaje regular
T_p	Periodo de pico de la ola para oleaje irregular
ω	Frecuencia angular de la ola
W	= $\tan(kB)$ = ancho relativo de la cámara adimensionalizado

Sub-índices

e	estimado
o	observado
FN0	estimado mediante el modelo FN0
FN1	estimado mediante el modelo FN1
W0	estimado mediante el modelo W0
W1	estimado mediante el modelo W1
i	Referido al ensayo i
j	Orden de cámara

Índice General

Agradecimientos.....	iii
Resumen.....	v
Abstract.....	ix
Resum.....	xiii
Símbolos.....	xvii
Indice general.....	xxi
Indice de figuras.....	xxv
Indice de tablas.....	xxxiii
Capítulo 1 Introducción.....	4
1.1. OBJETIVOS	6
1.2. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	7
1.3. METODOLOGÍA	9
Capítulo 2 Estado del conocimiento.....	14
2.1. INTRODUCCIÓN	14
2.2. ANTECEDENTES	15
2.3. ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES	19
2.3.1. <i>Estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan</i>	20
2.3.2. <i>Otras Tipologías Antirreflejantes</i>	38
2.4. FENÓMENOS HIDRODINÁMICOS EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ARJ.....	49
2.4.1. <i>Modelación física</i>	49
2.4.2. <i>Modelación analítica y numérica</i>	60
2.5. ESPECIFICACIONES DE LOS PRINCIPALES ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN	73

Capítulo 3	Modelación física	80
3.1.	INTRODUCCIÓN	80
3.2.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	81
3.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	85
3.3.1.	<i>Separación de oleaje incidente y reflejado</i>	85
3.3.2.	<i>Parametrización del oleaje</i>	88
3.4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	89
3.4.1.	<i>Modelo ARJ de una cámara</i>	89
3.4.2.	<i>Modelo ARJ de dos cámaras</i>	92
3.4.3.	<i>Modelo ARJ de tres cámaras</i>	94
3.5.	CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	96
Capítulo 4	Modelación analítica.....	100
4.1.	INTRODUCCIÓN	100
4.2.	JUSTIFICACIÓN DE LOS MODELOS ANALÍTICOS SELECCIONADOS	101
4.2.1.	<i>Modelo FNO</i>	102
4.2.2.	<i>Modelo W0</i>	103
4.3.	VALIDACIÓN DE LOS MODELOS FNO Y W0.....	104
4.3.1.	<i>Introducción</i>	104
4.3.2.	<i>Validación de los modelos FNO y W0 para estructuras marítimas ARJ de una cámara</i> 105	
4.3.3.	<i>Validación del modelo FNO y W0 para ARJ de dos cámaras</i>	111
4.4.	VALIDACIÓN DE LOS NUEVOS MODELOS FN1 Y W1.....	115
4.4.1.	<i>Ajuste de los modelos FNO y W0</i>	115
4.4.2.	<i>Validación de los modelos FN1 y W1 para ARJ de una cámara</i>	119
4.4.3.	<i>Validación de los modelos FN1 y W1 para ARJ de dos cámaras</i>	123
4.5.	CONSIDERACIONES DEL AJUSTE CON LOS MODELOS ANALÍTICOS.....	126

Capítulo 5	Modelo neuronal	130
5.1.	INTRODUCCIÓN	130
5.2.	REDES NEURONALES PODADAS CON ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS: NEUROPORT 3.0 131	
5.3.	MODELOS NEURONALES.....	137
5.3.1.	<i>Consideraciones iniciales</i>	137
5.3.2.	<i>Modelo ARJ de una cámara</i>	138
5.3.2.1.	<i>Oleaje regular</i>	138
5.3.2.2.	<i>Oleaje irregular</i>	142
5.3.2.3.	<i>Resultados</i>	144
5.3.3.	<i>Modelo ARJ de dos cámaras</i>	147
5.3.3.1.	<i>Oleaje regular</i>	147
5.3.3.2.	<i>Oleaje irregular</i>	151
5.3.3.3.	<i>Resultados</i>	154
5.3.4.	<i>Consideraciones finales</i>	155
5.4.	NUEVA FÓRMULA SEMIEMPÍRICA	155
5.4.1.	<i>Simulaciones para ajuste de modelo ARJ de una cámara</i>	157
5.4.2.	<i>Simulaciones para ajuste de modelo ARJ de dos cámaras</i>	159
5.4.3.	<i>Modelo FN1 modificado</i>	161
5.5.	COMPARACIÓN CON OTROS AUTORES	164
5.5.1.	<i>Oleaje regular</i>	164
5.5.2.	<i>Oleaje irregular</i>	167
5.6.	RESUMEN DEL CAPÍTULO	169
Capítulo 6	Conclusiones.....	174
Anexo A.	CR estimado mediante el modelo FNO.....	192
Anexo B.	CR estimado mediante el modelo W0.....	198

Anexo C.	Referencias del autor.....	202
Anexo D.	Resultados de ensayos.....	378

Índice de Figuras

Figuras del Capítulo 2

Figura 2.1.	Esquema de una estructura marítima ARJ con una cámara perforada	18
Figura 2.2.	Esquema de una estructura marítima ARJ con dos cámaras perforadas.....	19
Figura 2.3.	Estructura marítima antirreflejantes tipo Jarlan (Jarlan, 1961)	20
Figura 2.4.	Sección transversal del dique de Comeau Bay (Canadá, 1966).....	21
Figura 2.5.	Sección transversal del dique de Porto Torres (Italia, 1978).....	22
Figura 2.6.	Sección transversal del muelle del Puerto de Civitavechia, (Italia, 2007).....	23
Figura 2.7.	Sección transversal del dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Italia, 1986)	24
Figura 2.8.	Vista superior del dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Italia, 1986)	24
Figura 2.9.	Vista en alzado de cajones de Torrevaldaliga Nord (Italia, 2004).....	25
Figura 2.10.	Sección transversal cajones de Torrevaldaliga Nord (Italia, 2004).....	26
Figura 2.11.	Sección transversal del muelle 28 del Puerto de Hayovel (Israel, 2001).....	28
Figura 2.12.	Vista en planta del cajón antirreflejante para el muelle 28 del Puerto de Hayovel (Israel, 2001).....	29
Figura 2.13.	Sección transversal testero Sur (espigón nº 2) del Puerto de Bilbao (1987)	30
Figura 2.14.	Vista aérea del testero Sur (espigón nº 2)del Puerto de Bilbao (1987)	30

Figura 2.15. Sección transversal del cajón tipo muelle del Puerto de Algeciras (2010)....	31
Figura 2.16. Planta del cajón tipo dique del Puerto de Algeciras (2010).....	32
Figura 2.17. Frontal del cajón tipo del muelle de la Ribera en el Puerto de Carboneras, Almería (2009).....	33
Figura 2.18. Planta del cajón tipo del muelle de la Ribera en el Puerto de Carboneras, Almería (2009).....	34
Figura 2.19. Sección de dique con cámara de frontal curvado, Puerto de Funakawa (Japón, 1984)	35
Figura 2.20. Dique con cajón semicircular, Puerto de Miyazaki (Japón, 1993)	35
Figura 2.21. Tipología simulada del Puerto de Tánger (Marruecos, 1997).....	36
Figura 2.22. Vistas del dique exterior del Puerto de Tánger (Marruecos, 1997).....	37
Figura 2.23. Sección transversal del dique del Puerto de Beirut (Líbano, 2004)	37
Figura 2.24. Vista del dique-mirador del Puerto de Beirut (Líbano, 2004)	38
Figura 2.25. “Dique rompeolas” ES 2232248 (2005).....	39
Figura 2.26. “Estructura de baja reflexión” ES 2262405 (2006).....	40
Figura 2.27. Vista 3D del Dique antirreflejantes de cámaras cilíndricas WO2008062087 (2008)	40
Figura 2.28. Esquema del fenómeno del “Dique antirreflejante” de cámaras cilíndricas WO20080622087 (2008).....	41
Figura 2.29. Forma en planta de “Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje” ES200931049 (2009)	42

Figura 2.30. “Wave dissipating caisson and wave dissipating structure” JP2002275855 (2002)	43
Figura 2.31. “Waves-breaking type caisson and breakwater therewith” JP6002316 (1994)	43
Figura 2.32. “Wave dissipating cell structure” JP10168851 (1998).....	44
Figura 2.33. “Separating and combining type breakwater revetment” JP58000508 (1983).	44
Figura 2.34. “Breakwater structure” JP62055309 (1987)	44
Figura 2.35. “Breakwater structure” JP2000319839 (2000)	45
Figura 2.36. “Wave dissipation caisson” JP2002309540 (2002)	45
Figura 2.37. Sección de dique tipo caja, Puerto de Osaka (Japón)	46
Figura 2.38. Sección de dique con cámara frontal inclinado, Puerto de Niigata (Japón, 2001)	47
Figura 2.39. Vista de la maqueta del dique antirreflejantes en el Puerto de Castellón (2010).	48
Figura 2.40. Estructura antirreflejantes tipo ARC en el Puerto de Beirut (Líbano, 1994). 49	
Figura 2.41. Forma en planta del cajón tipo ARC en el Puerto de Beirut (Líbano, 1994). 49	
Figura 2.42. Definición de sección de cámara antirreflejante tipo Jarlan (Jarlan, 1965).. 50	
Figura 2.43. Sección transversal del dique-cajón ensayado por Jianyi (1992).....	53
Figura 2.44. Planta de dique-cajón ensayado por Jianyi (1992)	54
Figura 2.45. Esquema de sección(izq) y planta(der) del modelo ensayado por Zhu and Chwang (2001).....	56

Figura 2.46. Sección del modelo ensayado por Park et al. (1993) y Suh et al. (2006)	58
Figura 2.47. Sección del modelo ensayado por Liu et al. (2008)	59
Figura 2.48. Sección ensayada por Kirca y Kabdasli (2009)	60
Figura 2.49. Diagrama esquemático del la estructura planteada por Losada et al. (1993)	64
Figura 2.50. Tipología del modelo propuesto por Suh and Park (1995)	65
Figura 2.51. Sección del modelo teórico propuesto por Isaacson et al. (2000)	66
Figura 2.52. Esquema del modelo numérico propuesto por Li et al. (2003): (a)Sección y (b)Planta	68
Figura 2.53. Esquema del modelo estudiado por Teng et al.(2004):(a) sección y (b) planta	69
Figura 2.54. Sección del modelo estudiado por Chen et al. (2007)	70
Figura 2.55. Esquema de la sección estudiada por Liu et al. (2007b)	71
Figura 2.56. Sección tipo del modelo estudiado por Liu et al. (2008)	72
Figura 2.57. Vista esquemática del dique antirreflejanates de cámara cilíndrica del puerto de Nagashima (Japón).....	73

Figuras del Capítulo 3

Figura 3. 1. Sección longitudinal del canal de ensayos del LPC-UPV.	81
Figura 3. 2. Modelo ARJ de una cámara con abertura de orificios.....	81
Figura 3. 3. ARJ con aberturas de orificios	82
Figura 3. 4. ARJ con aberturas de ranuras.....	82
Figura 3. 5. Esquema de la onda de oleaje y sensores necesarios para su definición.....	84

Figura 3. 6.	Disposición de los sensores de medida.	84
Figura 3. 7.	Vista de la interface del software de método de separación de oleaje I+R LASA	88
Figura 3. 8.	CRo (observado) en ARJ de una cámara y abertura de orificios	90
Figura 3. 9.	CRo (observado) en ARJ de una cámara y abertura de ranuras.....	91
Figura 3. 10.	CRo (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de orificio (p1% =13% y p2%=5%)	92
Figura 3. 11.	CRo (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de orificio (p1% =35% y p2%=26%)	93
Figura 3. 12.	CRo (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de ranura (p1% =30% y p2%=20%)	93
Figura 3. 13.	CRo (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de ranura (p1% =40% y p2%=30%)	94
Figura 3. 14.	CRo (observado) en triple-cámara ARJ y abertura de orificio (p1% =35%, p2%=15% y p3%=5%)	95
Figura 3. 15.	CRo (observado) en triple-cámara ARJ y abertura de ranura (p1% =40%, p2%=30% y p3%=20%).....	95

Figuras del Capítulo 4

Figura 4. 1.	Esquema de ARJ de: (a) una cámara y (b) dos cámaras.....	105
Figura 4. 2.	Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FNO para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura.....	107
Figura 4. 3.	Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FNO para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio	108

Figura 4. 4. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W0 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura.....	109
Figura 4. 5. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W0 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio	110
Figura 4. 6. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FNO para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura	112
Figura 4. 7. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FNO para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio.....	113
Figura 4. 8. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W0 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura	113
Figura 4. 9. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W0 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio.....	114
Figura 4. 10. Ajuste de Cc para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura.....	116
Figura 4. 11. Ajuste de Cc para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio.....	116
Figura 4. 12. Ajuste de Cc1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranuras.....	117
Figura 4. 13. Ajuste de Cc1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificios.....	117
Figura 4. 14. Ajuste de coeficiente α vs. p%.....	118
Figura 4. 15. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FN1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura.....	120
Figura 4. 16. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FN1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio	121
Figura 4. 17. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura.....	122

Figura 4. 18. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio123

Figura 4. 19. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FN1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura124

Figura 4. 20. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo FN1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio.....125

Figura 4. 21. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura125

Figura 4. 22. Ajuste de REe (estimado) respecto de REo (observado) con el modelo W1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio.....126

Figuras del Capítulo 5

Figura 5.1. Topología de una NN totalmente conexcionada136

Figura 5.2. Topología de NN podada.....137

Figura 5.3. Esquema de modelo ARJ de una cámara.....138

Figura 5.4. Topología inicial de la red para ARJ una cámara y oleaje regular.....140

Figura 5.5. Caracterización de la estrategia evolutiva (ES).....140

Figura 5.6. Topología de la NN optimizada para modelo ARJ de una cámara.....142

Figura 5.7. Topología inicial de la red para ARJ una cámara y oleaje irregular.....143

Figura 5.8. Topología de la NN optimizada para modelo ARJ de una cámara.....144

Figura 5.9. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (REe) respecto del RE observado (REo) para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura145

Figura 5.10. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (REe) respecto del RE observado (REo) para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio.....146

Figura 5.11. Esquema de modelo ARJ de dos cámaras.....147

Figura 5.12. Topología inicial de la NN para ARJ dos cámaras y oleaje regular.....149

Figura 5.13. Topología de la NN podada para modelo ARJ de dos cámaras (oleaje regular)151

Figura 5.14. Topología inicial de la NN para ARJ dos cámaras (oleaje irregular).....152

Figura 5.15. Topología de la NN podada para modelo ARJ de dos cámaras (oleaje irregular)153

Figura 5.16. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (REe) respecto del RE observado (REo) para ARJ de dos cámaras.....154

Figura 5.17. RE(NN) en relación a RE_{FN1} para diferentes porosidades en ARJ de una cámara.158

Figura 5.18. RE(NN) en relación a RE_{FN1} para diferentes porosidades(p2%) en ARJ de dos cámaras.160

Figura 5.19. RE(regular) en relación a REo(irregular)162

Figura 5.20. Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje regular).166

Figura 5.21. Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje irregular).....168

Indice de Tablas

Tablas del Capítulo 2

Tabla 2. 1. Rango de las características de ensayos realizados con oleaje regular.....	74
Tabla 2. 2. Rango de variables adimensionales en ensayos realizados con oleaje regular	75
Tabla 2. 3. Rango de las características de ensayos realizados con oleaje irregular.....	75
Tabla 2. 4. Rango de variables adimensionales de ensayos realizados con oleaje irregular....	75
Tabla 2. 5. Características de ensayos realizados	76

Tablas del Capítulo 3

Tabla 3. 1. Características y rangos de variables en ensayos regulares	96
Tabla 3. 2. Características y rangos de variables en ensayos irregulares	96

Tablas del Capítulo 4

Tabla 4. 1. rMSE de RE de los modelos FN0 y W0 para ARJ de una cámara.....	106
Tabla 4. 2. rMSE de RE de los modelos FN0 y W0 para ARJ de dos cámaras.....	111
Tabla 4. 3. rMSE de REe (estimado) respecto de REo (observado) de los modelos FN1 y W1 para ARJ de una cámara.....	119
Tabla 4. 4. rMSE de RE de los modelos FN1 y W1 para dos cámaras ARJ.	124

Tablas del Capítulo 5

Tabla 5.1. Error rMSE de RE estimado con modelo neuronal para oleaje regular, RE _{NN} (regular) y oleaje irregular RE _{NN} (irregular) en ARJ de una cámara.....	147
--	-----

Tabla 5.2.	Error rMSE de RE estimado con modelo neuronal para oleaje regular, $RE_{NN}(\text{regular})$ y oleaje irregular $RE_{NN}(\text{irregular})$ en ARJ de dos cámaras.....	155
Tabla 5.3.	Rango de las variables en simulaciones de los modelos NN para ARJ de una cámara	157
Tabla 5.4.	Rango de las variables en simulaciones de los modelos NN para ARJ de dos cámaras	159
Tabla 5.5.	Error rMSE para oleaje regular en estructura marítima ARJ de una cámara del modelo neuronal, RE_{NN} , y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{regular})$	161
Tabla 5.6.	Error rMSE para oleaje regular en estructura marítima ARJ de dos cámaras del modelo neuronal, RE_{NN} , y la fórmula semiempírica, $RE(\text{regular})$	162
Tabla 5.7.	Error rMSE para oleaje irregular en estructura marítima ARJ de una cámara del modelo neuronal, RE_{NN} , y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{irregular})$	163
Tabla 5.8.	Error rMSE para oleaje irregular en estructura marítima ARJ de dos cámaras del modelo neuronal, RE_{NN} , y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{irregular})$	163
Tabla 5.9.	Comparación con diferentes modelos y ensayos (oleaje regular).	166
Tabla 5.10.	Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje irregular).....	168
Tabla 5.11.	Rango de validez de las variables para oleaje regular	170
Tabla 5.12.	Rango de validez de las variables para oleaje irregular.....	170
Tabla 5.13.	r_{MSE} de CR para ARJ de 1-cámara con oleaje regular	170
Tabla 5.14.	r_{MSE} de CR para ARJ de 1-cámara con oleaje irregular	171
Tabla 5.15.	r_{MSE} de CR para ARJ de doble cámara para oleaje regular.....	171
Tabla 5.16.	r_{MSE} de CR para ARJ de doble cámara para oleaje irregular	171

CAPÍTULO 1

Introducción

Capítulo 1

Introducción

Uno de los conceptos de más actualidad en estos inicios del siglo XXI es “globalización”. Unos lo interpretan como una opción cogida por los gobiernos y las economías para optimizar recursos y otros como el resultado de una revolución tecnológica sin precedentes. La realidad es que en las prácticas actuales del comercio globalizado, el empleo de las unidades de carga, fundamentalmente el contenedor, se ha convertido en elemento insustituible del transporte marítimo de largas distancias. La respuesta del sector portuario ante esta nueva realidad se ha visto reflejada en el aumento constante de la capacidad de los buques cuyos mayores calados obligan a los puertos a abrigar zonas de mayor profundidad y, por tanto, más expuestos a condiciones climáticas adversas.

Otro de los conceptos de actualidad creciente en este nuevo siglo es “medio ambiente”, del que se derivan infinidad de acciones de protección y conservación del planeta Tierra en el que se desarrolla, entre otras, la actividad comercial globalizada. Estas acciones, focalizadas en lo referente a las obras marítimas, se centran en aspectos como el de reducir la huella energética y del

carbono, minimizar el consumo de materiales (canteras), minimizar el tráfico, el ruido, etc.

Ambos condicionantes son los que, principalmente, propician que las obras portuarias de abrigo con tipología en talud se hayan visto frenadas frente a la tipología de dique vertical de cajones. Además de estos condicionantes, las estructuras de pared vertical presentan numerosas ventajas frente a otras tipologías, tales como el mejor aprovechamiento del espacio marítimo, el ahorro económico en materiales y la optimización de los plazos de ejecución por el empleo de cajoneros.

No obstante, la estructura vertical se caracteriza por la reflexión casi total de la energía del oleaje, lo que supone una desventaja importante frente a los diques en talud en los que la reflexión suele ser inferior al 20% de la energía del oleaje incidente. Este inconveniente supone que una solución vertical se convierte en un problema añadido cuando la reflexión implica un aumento importante de las condiciones de agitación en el canal de entrada y antepuerto; así como, la generación de ondas de resonancia en las dársenas, o el aumento de la altura de ola máximas, con el consiguiente aumento de las corrientes de borde, la erosión local, el rebase, y los esfuerzos sobre el dique. No pocas veces la nueva alineación de un dique vertical ha provocado un cambio significativo en las condiciones de oleaje sobre tramos de costa adyacentes que a su vez ven modificada su forma de equilibrio.

La reducción de la energía que refleja una estructura vertical ha supuesto un reto para la ingeniería marítima desde hace muchas décadas, desarrollándose tipologías de diques y muelles de baja reflectividad basadas en el concepto Jarlan (1961) y definidas en su mayoría por cámaras huecas que permiten la entrada de

agua en su interior a través de la abertura de huecos en las paredes de las mismas. Las numerosas innovaciones relacionadas con este tipo de estructuras marítimas están siendo incorporadas tanto en muelles como en diques, en la medida en que sean constructivamente posibles, se pueda realizar un diseño adaptado a las necesidades de reducción de la energía del oleaje y, en consecuencia, puedan suponer una disminución de la agitación interior, la estabilidad de la estructura, la reducción del rebase, los efectos sobre la costa y la reducción de los costes.

Llegados a este punto, surge la justificación del trabajo que se presenta y la motivación para realizar esta Tesis Doctoral, ya que el comportamiento hidrodinámico que interviene en el fenómeno de reflexión del oleaje de este tipo de estructuras es complejo y su conocimiento es aún limitado. Conocer de forma más precisa la influencia que diferentes variables climáticas y estructurales tienen en la estimación de la capacidad de absorción de energía de este tipo de estructuras permitirá un diseño más adecuado y ajustado a los requerimientos planteados para cada aplicación.

1.1. Objetivos

La limitación existente en cuanto a fórmulas de diseño que permitan estimar con fiabilidad la energía reflejada que es capaz de absorber una estructura marítima ARJ es la base de partida de este trabajo, en el que se establece como objetivo principal aportar nuevos modelos de estimación del CR en este tipo de estructuras marítimas que tengan en cuenta los fenómenos no lineales existentes en las relaciones entre las variables climáticas y los parámetros estructurales.

En el proceso llevado a término para alcanzar este objetivo, se implementa una nueva metodología de aplicación de técnicas de inteligencia artificial, tales como las redes neuronales y los algoritmos genéticos, para encontrar las componentes no lineales del fenómeno hidrodinámico que los modelos analíticos existentes no incorporan.

Además, se amplía la base de datos experimental mediante la realización de casi dos mil ensayos en modelo físico sobre la que se basan los ajustes de las fórmulas existentes y se generan las nuevas formulaciones.

1.2. Desarrollo de la investigación

La Tesis Doctoral que se presenta es el resultado de un proceso de investigación y estudio llevado a cabo por el autor mediante la participación en los proyectos de investigación, relacionados con los fenómenos de reflexión y disipación de energía de oleaje en estructuras marítimas antirreflejantes, siguientes:

“Estudio de muelles y diques verticales antirreflejantes” (MUDIVAR, 2002-2005). Financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

“Estudio del rebase y la estabilidad de diques verticales antirreflejantes” (REDIVAR, 2007-2009). Financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.

“Estudio de muelles de cajones antirreflejantes” MUCAR (2008-2010). Financiado por la Generalitat Valenciana, a iniciativa de la empresa CYES.

“Diseño y adaptabilidad de Cajoneros convencionales para la construcción de Diques y Muelles AR” (CADIMA, 2008-2011)“. Financiado por el Ministerio de Fomento.

Algunos de los resultados de la investigación han sido objeto de publicación en congresos de ingeniería marítima nacionales e internacionales:

Estudio de la reflexión del oleaje en diques verticales antirreflejantes (Garrido et al., 2005), presentado en las VIII Jornadas nacionales de Costas y Puertos en Sitges.

Study of reflection of perforated vertical breakwaters (Garrido et al. 2006), presentado en el congreso internacional ICCE'06 en San Diego (USA).

Modelo neuronal para estimar la reflexión del oleaje en diques verticales antirreflejantes (Garrido y Medina, 2007), presentado en las IX Jornadas nacionales de Costas y Puertos en San Sebastián.

Muelle antirreflejantes de tablestacas para la ampliación del Puerto de Cullera (Garrido et al., 2009), presentado en las X Jornadas nacionales de Costas y Puertos en Santander.

Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caissons (Garrido et al. 2010), presentado en el congreso internacional ICCE'10 en Sanghai (China).

Además, la investigación en el ámbito de la innovación se ha visto materializada en el desarrollo de nuevas tipologías de estructuras marítimas antirreflejantes con participación directa del autor:

Block for Anti-Reflectant Quay, patente WO/2008/062086.

Anti-Reflectant Breakwater, patente WO/2008/062087.

Anti-Reflecting Modular Element, patente WO/2008/059083.

Estructura Marítima Vertical con Cámaras de Unidades Múltiples para la Atenuación de la Reflexión de Oleaje, patente ES200931049.

Los documentos a los que se ha hecho referencia se adjuntan completos como *Anexo C. Referencias del autor*.

1.3. Metodología

Una vez queda justificada la motivación y se fijan los objetivos y la base de investigación desarrollada para la realización de esta Tesis Doctoral, se establece la estructura metodológica con la que se consiguen alcanzar los objetivos planteados.

Los trabajos propios de la Tesis Doctoral comienzan con la búsqueda, recopilación, clasificación y estudio de las referencias bibliográficas y documentales de los trabajos que están relacionados de algún modo con las estructuras marítimas antirreflejantes y, de modo particular, con el estudio de la reflexión del oleaje sobre ellas. Este estudio de las fuentes bibliográficas se realiza tanto a nivel de modelos empíricos, analíticos y numéricos, como a nivel de aplicaciones técnicas realizadas, lo que se describe en el *Capítulo 2 Estado del Conocimiento*. A la vista de los resultados obtenidos de esta primera etapa del trabajo, se decide centrar el trabajo posterior en el estudio, tanto a nivel de modelación física como de modelación analítica, en la tipología básica original, denominada estructura marítima antirreflejantes tipo Jarlan, en adelante ARJ, cuyas características son descritas en el *Capítulo 2*.

La necesidad de obtener un mejor ajuste de los resultados obtenidos con modelos analíticos obliga a la ampliación de la base de datos experimental existente, ya que la actual es escasa en cuanto a variedad de tipologías y rango de las variables ensayadas. El procedimiento seguido consiste en la realización de un

diseño experimental incluyendo la experimentación física sobre diferentes tipologías de modelo de ARJ con un amplio rango de porosidades y estados de mar. A partir de los datos registrados por los sensores de nivel, se procede a la estimación del coeficiente de reflexión de cada ensayo mediante la aplicación de un método de separación de oleaje incidente y reflejado. La descripción de las características del ensayo, el procesamiento de datos y los resultados experimentales obtenidos se muestra en el *Capítulo 3 Modelación física*.

De las diferentes formulaciones que explican el comportamiento de los modelos ARJ se han seleccionado dos modelos analíticos representativos, constatándose que es posible un mejor ajuste de determinados parámetros y, a partir de los resultados experimentales descritos en el Capítulo 3, se propone una formulación modificada de la existente para ambos modelos seleccionados. El fundamento de los modelos analíticos considerados, su desarrollo y su posterior modificación quedan descritos en el *Capítulo 4 Modelación analítica*.

La complejidad del fenómeno que se aborda, principalmente en cuanto al número de variables que intervienen en el mismo, hace necesaria la aplicación de nuevas técnicas de ajuste capaces de interpretar fenómenos con carácter no-lineal influidos por un número considerable de variables. Por esta razón, se aplican técnicas de inteligencia artificial, tales como redes neuronales podadas y las estrategias evolutivas, que permiten modelizar el fenómeno de la reflexión en las diferente tipologías estudiadas y que, aplicándolas a partir de los resultados de los modelo teóricos modificados, se utilizan para encontrar las relaciones de influencia entre las variables. Por último, a partir de los modelos neuronales se obtienen nuevas formulaciones semi-empíricas explícitas de fácil uso. El desarrollo de los modelos neuronales de ajuste, el resultado de los mismos y el

procedimiento de utilización seguido hasta llegar a las nuevas formulaciones se describen en el *Capítulo 5 Modelación neuronal*.

Finalmente, en el *Capítulo 6* se hace una recopilación a modo de conclusiones de todo el trabajo desarrollado a lo largo de la Tesis Doctoral y se apunta el camino hacia futuras aplicaciones.

CAPÍTULO 2

Estado del conocimiento

Capítulo 2

Estado del conocimiento

2.1. *Introducción*

Este capítulo recoge el estado de conocimiento que se ha utilizado para establecer la situación actual de los trabajos en investigación y desarrollo sobre las estructuras marítimas antirreflejantes y, en particular, sobre el estado del conocimiento referente a los fenómenos de reflexión en estructuras con capacidad de absorción de energía procedente del oleaje tipo Jarlan, a las que se ha denominado estructuras marítimas ARJ.

Para ello, se establecen y documentan los antecedentes relacionados con el problema que se aborda, el desarrollo actual de las técnicas y las aplicaciones realizadas sobre estructuras marítimas antirreflejantes, los fundamentos teóricos y prácticos del fenómeno hidrodinámico que se aborda y las especificaciones de los principales aspectos de la investigación.

El listado de referencias sobre el que se basa esta información se incluye en el último apartado de este documento de Tesis Doctoral.

2.2. *Antecedentes*

La principal función de las obras de abrigo de un puerto es generalmente la protección frente al oleaje de una zona de la costa para facilitar las operaciones que se realizan a su abrigo, ya que el límite de agitación máxima requerida para la mayoría de las operaciones de los buques es mucho menor que las que se ofrecen de manera natural en la costa a las profundidades de trabajo requeridas. Así pues, se hace necesaria la construcción de estructuras marítimas de abrigo que reduzcan las condiciones de agitación para un nivel de operatividad determinado en función del uso y la importancia comercial de cada puerto.

Por su parte, los muelles portuarios tienen la función de limitar una zona de agua suficiente en superficie y calados que facilite las maniobras y navegabilidad de los buques dentro de las dársenas y canales de acceso y, por otro lado, de aportar una zona de operaciones que reúna las condiciones necesarias para la actividad portuaria garantizando unas condiciones de oleaje que permitan las actividades de maniobra y amarre de las embarcaciones. Los procesos de multirreflexión y la presencia de ondas de resonancia que pueden llegar a superar ampliamente la altura de onda incidente, la difracción del oleaje en los diques exteriores o el oleaje que entra por la bocana haciendo que aumente la agitación interior pueden impedir que se cumplan estas condiciones. Se plantea entonces el problema de absorber o atenuar la energía del oleaje correspondiente a los fenómenos citados. En puertos pequeños o deportivos, así como en los canales de entrada al puerto, los efectos pueden ser similares a los descritos para puertos comerciales añadiéndose el efecto que la reflexión puede ocasionar en la navegación. Desde un punto de vista práctico, en el diseño de

cualquier estructura para este propósito se deben considerar aspectos económicos, de construcción, de estabilidad y de mantenimiento que pueden hacer una estructura preferible a otra.

Tanto en diques como en muelles y en otro tipo de aplicaciones (canales de acceso a embarcaciones, protección de riberas de ríos, muros de protección de la costa, etc.), la estructura más habitual y en pleno auge es la tipología de pared vertical, como se ha justificado en el *Capítulo 1*. La principal desventaja de esta tipología, derivada del carácter casi totalmente reflejante de la misma, trata de paliarse mediante el desarrollo de nuevos diseños capaces de disipar parte de la energía del oleaje que incide sobre la estructura.

Para reducir la reflexión en diques y muelles verticales se han desarrollado numerosos diseños de diques y muelles de baja reflectividad, compuestos en su mayoría por cámaras huecas que permiten la entrada de agua en su interior a través de los huecos en las paredes de las mismas. Este tipo de estructuras marítimas antirreflejantes están siendo adoptados a lo largo de todo el mundo debido a su alta capacidad de absorción de energía, la mayor estabilidad del cajón antirreflejante, la reducción del rebase, la menor erosión, la reducción de fuerzas (especialmente las impulsivas), los menores efectos negativos sobre la costa, con el consecuente ahorro económico y mejora ambiental que ello supone. La aplicación de estas nuevas tipologías ha supuesto que se haga necesario disponer de métodos de diseño, para lo cual es necesario conocer el fundamento teórico y físico del fenómeno hidrodinámico que ocurre en este tipo de estructuras marítimas.

Las estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan (ARJ) se basan en el principio de las cámaras disipantes de energía mediante paredes frontales

perforadas, en las cuales, el oleaje incidente es en parte reflejado en la pared frontal perforada y en parte transmitido dentro de la cámara del dique.

La onda incidente tiene una primera reflexión en el paramento frontal o parte de la estructura más adelantada y la última reflexión en la parte más atrasada alcanzada por el flujo; si el tiempo de ida y vuelta del flujo entre el paramento frontal y el trasero es mucho menor que la mitad del periodo de la onda incidente, no hay interferencia significativa entre reflexiones y la eficacia antirreflejante es baja. La disipación de energía es también debida, visto de otro modo, al efecto de la turbulencia y la viscosidad del flujo a su paso por las perforaciones de la pared. Estas pérdidas dependen de la amplitud de la ola y de la distancia entre la pared perforada y la pared posterior. La máxima pérdida de energía se da cuando la velocidad inducida por el oleaje sobre la pared sea máxima en la pared perforada. Esto ocurrirá cuando el ancho de la cámara es aproximadamente la cuarta parte de la longitud de onda en la cámara, o un múltiplo impar de la distancia. Sin embargo, cuando la velocidad es cero la pérdida de energía es nula y la pared perforada no disipa energía. Esto ocurre cuando el ancho de la cámara es aproximadamente la mitad de la longitud de onda, o un múltiplo par de la distancia. La pérdida de energía debida a este efecto está relacionada con la resistencia que la pared opone a la entrada del agua, de modo que si esta resistencia es grande la ola transmitida será débil y la ola incidente será totalmente reflejada, mientras que si la resistencia es baja la mayor parte de la reflexión ocurrirá en la pared posterior. Por lo tanto, existe una porosidad óptima de la pared perforada para una reflexión mínima. Por otra parte, se produce un efecto de disipación de energía en el interior de la cámara debida a otros factores, tales como la interacción de los chorros de agua procedentes de

las aberturas de la pared perforada con el agua almacenada en la cámara y las turbulencias propias dentro de la misma. Además, puede considerarse el efecto de la diferencia de profundidades entre el interior y el exterior de la cámara como otra causa fundamental de la disipación de energía. Todo ello, unido a las numerosas variables que intervienen en el proceso, hace muy complejo el estudio del comportamiento del flujo en esta tipología de estructuras marítimas.

Se puede diferenciar entre variables que definen la geometría y variables características del oleaje (Fig. 2.1). Entre la principales variables geométricas se definen el ancho de la cámara (B), el ancho de la ranura o diámetro del orificio (a), la distancia entre aberturas (A), el espesor de la pared perforada (e) y el número de cámaras (n) entre otras. Ente las principales variables propias del oleaje se definen la altura de ola (H), la longitud de onda (L), la profundidad de agua cara mar (d), la profundidad del agua dentro de la cámara (d'), la fase de la onda (φ) y el ángulo de incidencia del oleaje (θ) entre otras.

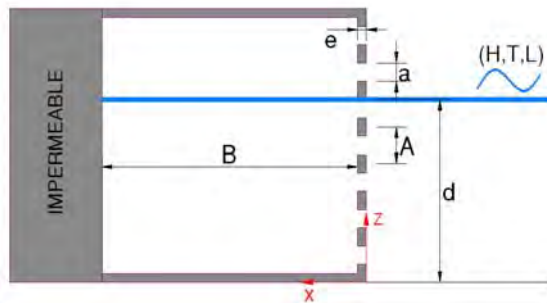


Figura 2.1. Esquema de una estructura marítima ARJ con una cámara perforada

En el caso de estructura marítima ARJ de dos cámaras, se introducen nuevas variables relacionadas con la geometría que son el ancho de la segunda cámara (B_2), el ancho de la ranura o diámetro del orificio de la segunda pared

perforada (a_2), la distancia entre aberturas (A_2) y el espesor de la pared perforada (e_2) (Fig. 2.2).

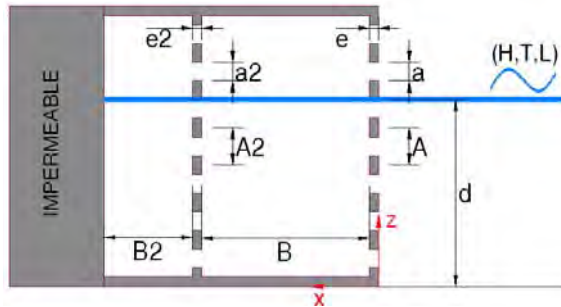


Figura 2.2. Esquema de una estructura marítima ARJ con dos cámaras perforadas

A continuación, se recopilan las diferentes tipologías de estructura marítima antirreflejantes existentes, los modelos teóricos desarrollados para explicar el fenómeno hidrodinámico y las especificaciones de los principales aspectos a destacar en el proceder de esta Tesis Doctoral.

2.3. Estructuras marítimas antirreflejantes

Existen distintos diseños de estructuras marítimas con propiedades para disipar energía. Entre las más usadas destacan los cajones de pared perforada para la construcción de diques verticales y muelles, las estructuras formadas por simples o múltiples pantallas con porosidad y espaciado variable y las piezas o bloques prefabricados para muelles.

Típicamente, las paredes tienen ranuras verticales y horizontales u orificios circulares o rectangulares. La porosidad de la pared, definida como la relación entre el área perforada y el área total de pared, suele estar comprendida entre 15-40% y el ancho de la cámara, B , entre $1/10$ y $1/4$ de la longitud de onda local o en las proximidades del dique.

En los siguientes apartados se hace un repaso de las tipologías diseñadas más representativas, así como de algunos de los que se han llevado a la práctica constructiva, de los considerados como tipo Jarlan y de otras tipologías.

2.3.1. Estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan

La idea original de estructura vertical antirreflejantes fue propuesta por Jarlan (1961) con la idea de reducir la acción del oleaje sobre estructuras verticales reflejantes, de ahí que, en adelante, a este tipo de estructura marítima de baja reflectividad se le denomine en esta Tesis Doctoral por el acrónimo ARJ (AntiReflejante tipo Jarlan). Las estructuras marítimas ARJ constan, generalmente, de una primera fila de celdas huecas con pared perforada, bien sea ranurada o de orificios, y pared posterior impermeable (Fig. 2.3).

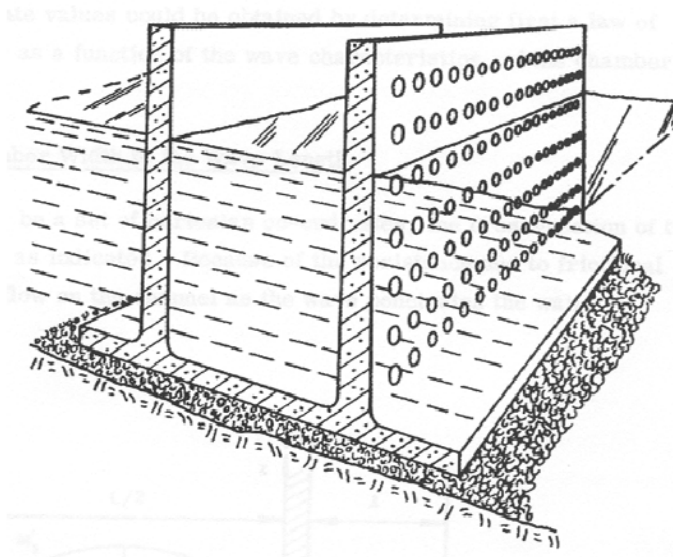


Figura 2.3. Estructura marítima antirreflejantes tipo Jarlan (Jarlan, 1961)

Las primeras aplicaciones prácticas de estas estructuras fueron construidas en Canadá (Comeau Bay) en 1966 (Fig. 2.4) y en Japón (Kobe Port y Takamatsu Port) en 1969 y 1970, respectivamente.

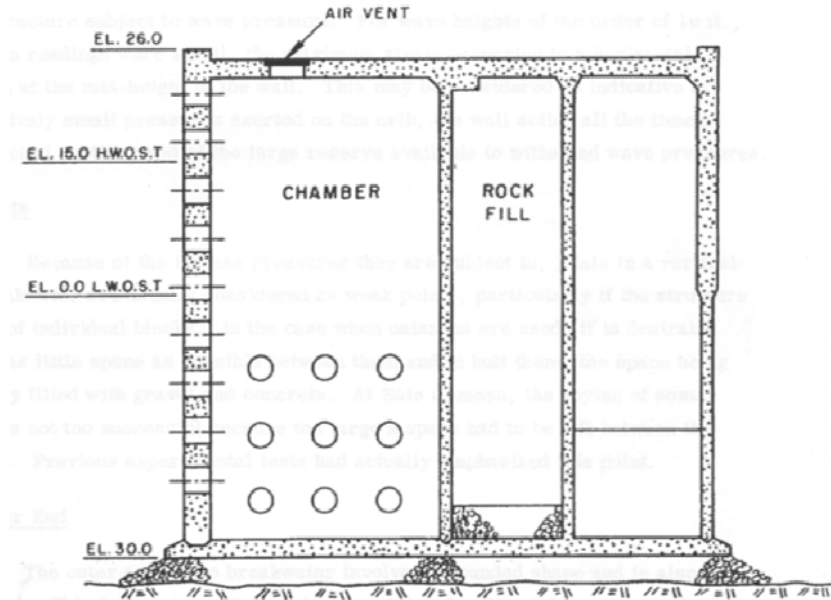


Figura 2.4. Sección transversal del dique de Comeau Bay (Canadá, 1966)

A partir de estas primeras aplicaciones, son muchas las variedades que sobre la estructura marítima ARJ se han venido realizando a lo largo de los años, especialmente en Japón (Takahashi, 2006), donde se han construido cajones tipo ranura, multi-cámara, planos inclinados y curvados. Por ejemplo, en el Puerto de Nagasaki se encuentra una sección típica de cajón con una cámara ranurada construido en aguas profundas ($h=38$ m) en condiciones de oleaje moderado ($H_s=4.8$ m y $T_s=10.4$ s). Se trata de un cajón con paredes de 1 m de espesor, porosidad en la pared ranurada de $p\%=13.5\%$ y un ancho de cámara $B=7$ m a una altura de 4.5 m desde la base del cajón.

Otras mejoras introducidas para aumentar la efectividad antirreflejante de estas estructuras pasan por aumentar el ancho de la zona antirreflejantes perforando dos o más celdas. Debido a la limitación en el rango de frecuencia que es capaz de atenuar un cajón de una sola cámara perforada, se diseñaron cajones con doble cámara perforada que demostraron ser más eficaces en la reducción del coeficiente de reflexión para un rango más amplio de frecuencias que los cajones de una sola cámara.

Ejemplo de este tipo de cajones es el construido en Porto Torres en Sassari, Italia (1978), en el que se encuentran tres cámaras de profundidades descendientes con paredes de porosidad 30% y con ranuras rectangulares (Fig. 2.5).

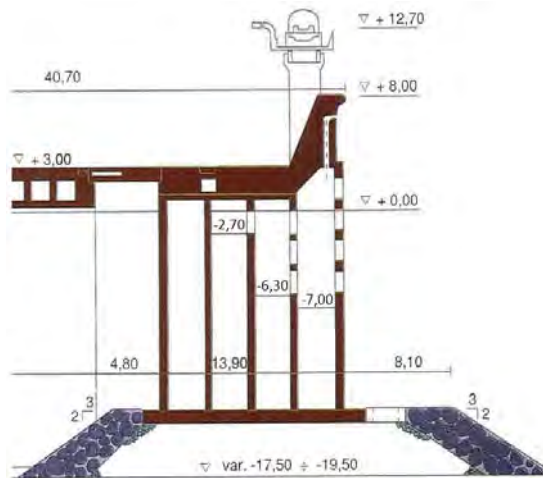


Figura 2.5. Sección transversal del dique de Porto Torres (Italia, 1978)

El dique principal de tipo vertical de cajones de Porto Torres se construyó entre 1970 y 1978 con una longitud de 1714 m. La reconstrucción de este dique en los años 90 incluye un tramo de dique en talud de 1509 m y un tramo de dique

vertical de 892 m, de los cuales unos 520 m son de transición hidráulica entre ambos, por lo que se diseñó con una tipología parcialmente reflejante con cámaras de absorción que además pretenden reducir los rebases. La sección antirreflejante consta de una pared frontal con ventanas rectangulares de 0.9m x 1.90m y tres filas de celdas perforadas con fondo a distinto nivel. La porosidad de la pared frontal es de aproximadamente el 30%, alcanzando la base de la primera y segunda fila de celdas perforadas la cota -7,0 m y -6.3 m, respectivamente, y la cota -2.7 m para la tercera fila. El cajón corona a la cota +3,0 m bajo una superestructura alineada con la pared frontal que corona a la cota +8,0 m y provista de salidas de aire de las cámaras.

En Italia son también varios los ejemplos de diques perforados, algunos descritos por Franco (1994) y Franco et al. (1998), tales como el de Nápoles, Torrevaldaliga y el Puerto de Civitavecchia (Fig.2.6).

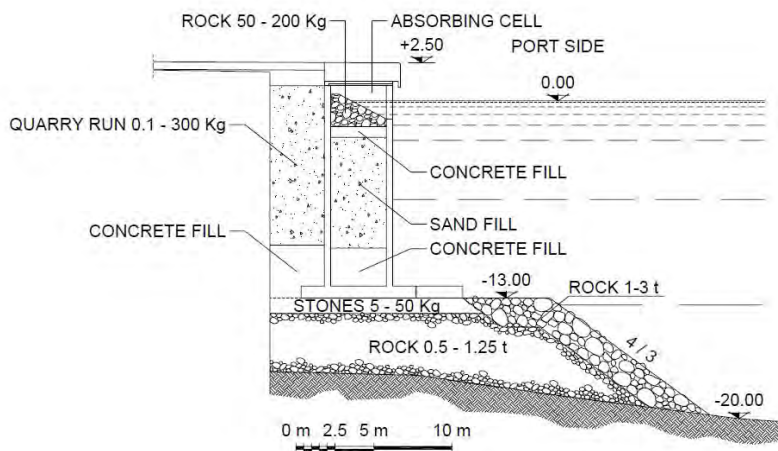


Figura 2.6. Sección transversal del muelle del Puerto de Civitavecchia, (Italia, 2007)

El dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles, Italia (1986) se diseñó para mejorar la navegabilidad y está caracterizado por incluir dentro de las

cámaras 4 elementos antirreflejantes tipo rulo, de 80 cm. de diámetro, distribuidos uniformemente en el área entre 0.40 m. y 3.8 m. respecto del nivel medio. Externamente tiene un frontal curvado para reducir esfuerzos y reflexiones, verificados tras la realización de experimentos físicos a escala 1:45 y modelos numéricos, tanto de sección como de planta, obteniéndose reducciones de un 25% del CR y de un 6% en la Hs. La superestructura está retranqueada unos 6,5 m. respecto del frontal del cajón (Fig. 2.7 y 2.8).

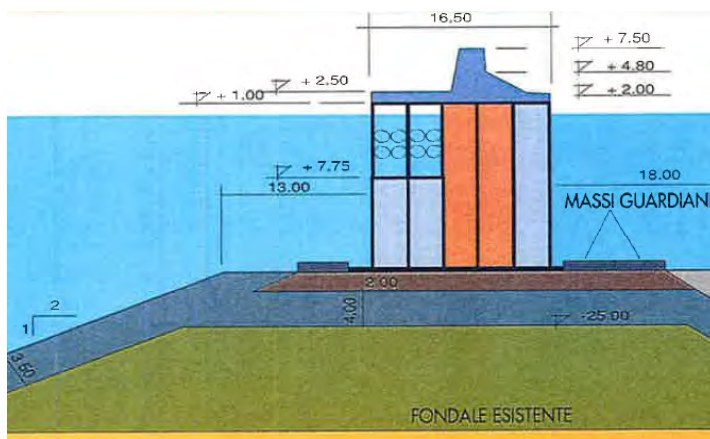


Figura 2.7. Sección transversal del dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Italia, 1986)



Figura 2.8. Vista superior del dique Duca Degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Italia, 1986)

La infraestructura portuaria de la central térmica de Torrevaldaliga Nord (Italia) fue construida en 2004 y tiene cajón de celdas rectangulares con cámaras perforadas (Fig. 2.9).

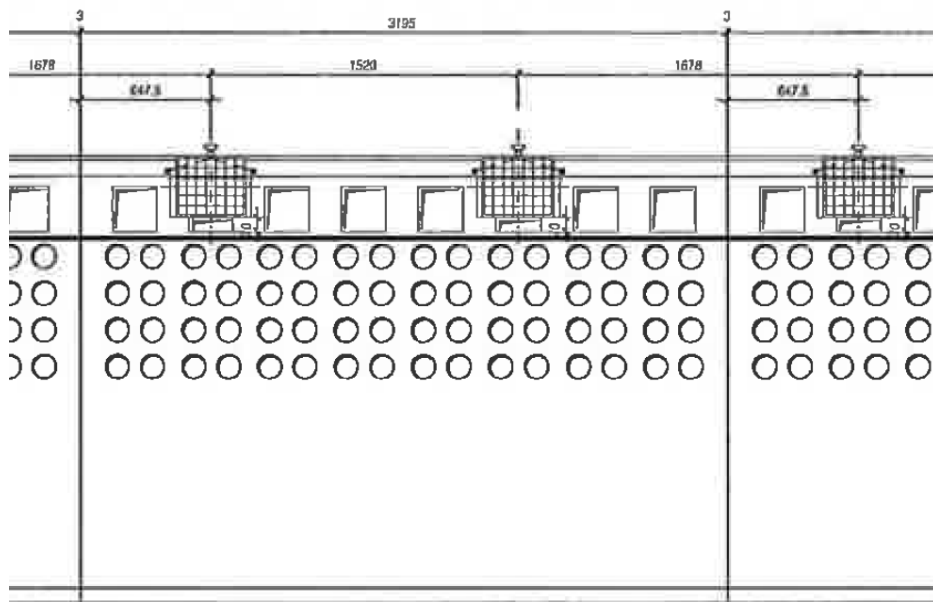


Figura 2.9. Vista en alzado de cajones de Torrevaldaliga Nord (Italia, 2004)

La pared frontal consta de ventana perforada cuadrada superior de 2,20 m. de lado y orificios inferiores de 1,20 m. de diámetro, desde la cota +3,0 m hasta la cota -7,50 m. Tres filas de celdas están también comunicadas transversalmente, con ventanas rectangulares de 2,20 m. de ancho por 7,50 m. de altura (Fig. 2.10).

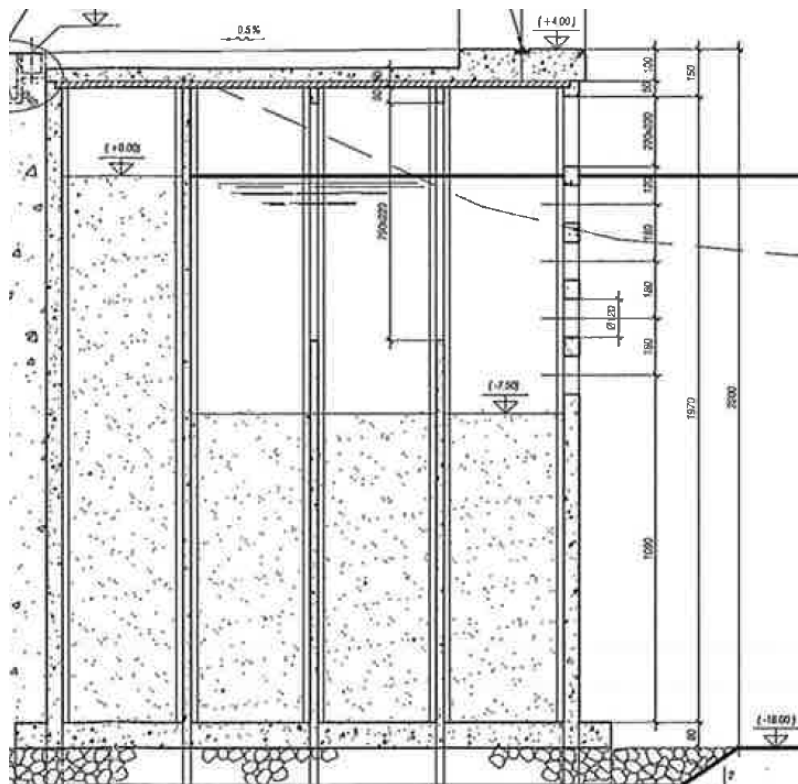


Figura 2.10. Sección transversal cajones de Torrevaldaliga Nord (Italia, 2004)

Una variante sobre las anteriores es la de incluir escollera en dentro de las cámaras perforadas para provocar la reducción del flujo en el interior ,y en consecuencia, una mayor disipación de energía (Isaacson et al. 2000). Un dique de este tipo se construyó en la Bahía de Kelsey, British Columbia, Canadá. El dique está situado en una zona de fuertes temporales en invierno, donde la altura de ola de diseño es de 3 m, con un periodo de ola correspondiente en aguas profundas de 6 s y el rango de marea de 5.5 m. Se eligió un diseño de dique con pared perforada para sustituir al antiguo dique para disipar las fuerzas hidrostáticas debidas al rebase. El dique consta de una cámara perforada de 40 m de longitud

construida con paneles prefabricados de hormigón con una porosidad del 14%. El dique tiene una altura de 6.4 m, 1 m por encima del nivel medio, la anchura de la cámara es de 1.9 m, rellena con escollera de 0.75 m de diámetro medio, y una porosidad 0.5.

Y, propiamente aplicados a cajones que forman parte de estructuras de gravedad para formación de muelles, son de interés experiencias realizadas en países como Israel.

En el Puerto de Hayovel, se diseñó y ejecutó el muelle 24, cuyo diseño es de cajones antirreflejantes de celdas cuadradas con talud interior 3H:1V de escollera de entre 0.5 y 1 t. Estos están abiertos hasta la cuarta fila de celdas, siendo las dos primeras filas de profundidad -3,98 m a +1,0 m, la tercera fila hasta cota -2,66 m y la cuarta hasta cota -1,76 m (Fig. 2.11).

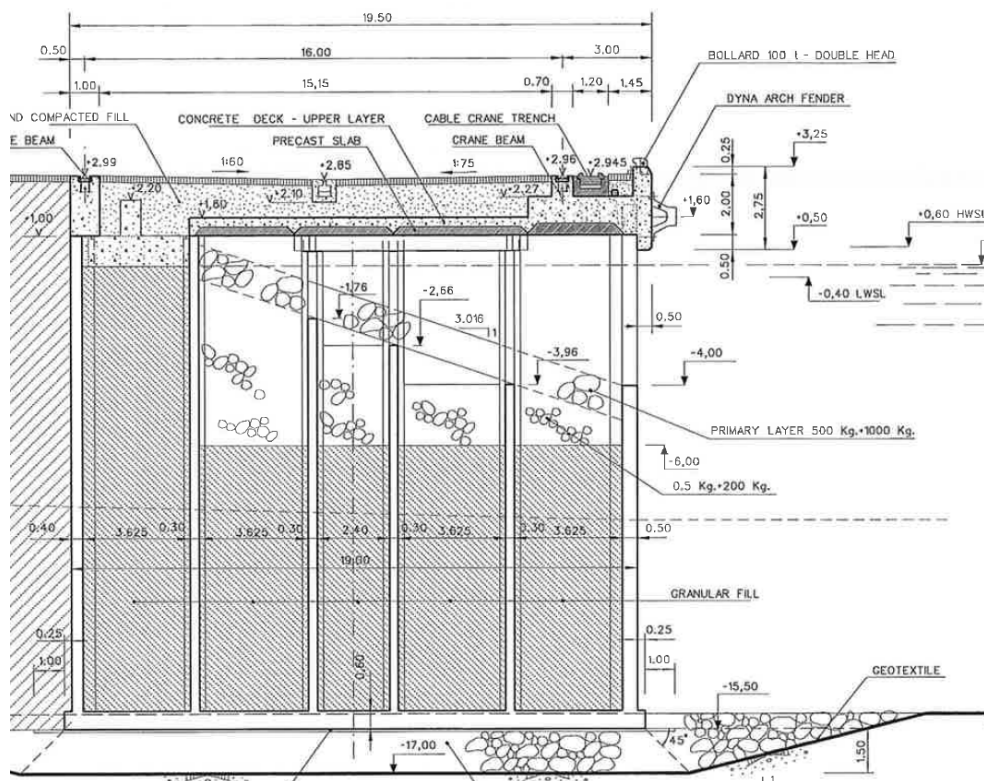


Figura 2.11. Sección transversal del muelle 28 del Puerto de Hayovel (Israel, 2001)

Además, este cajón tiene como peculiaridad la de utilizar el sistema tipo patio de manera que las celdas se comunican de forma longitudinal y transversal en la segunda y tercera fila, y sólo transversalmente en la primera y cuarta fila (Fig. 2.12).

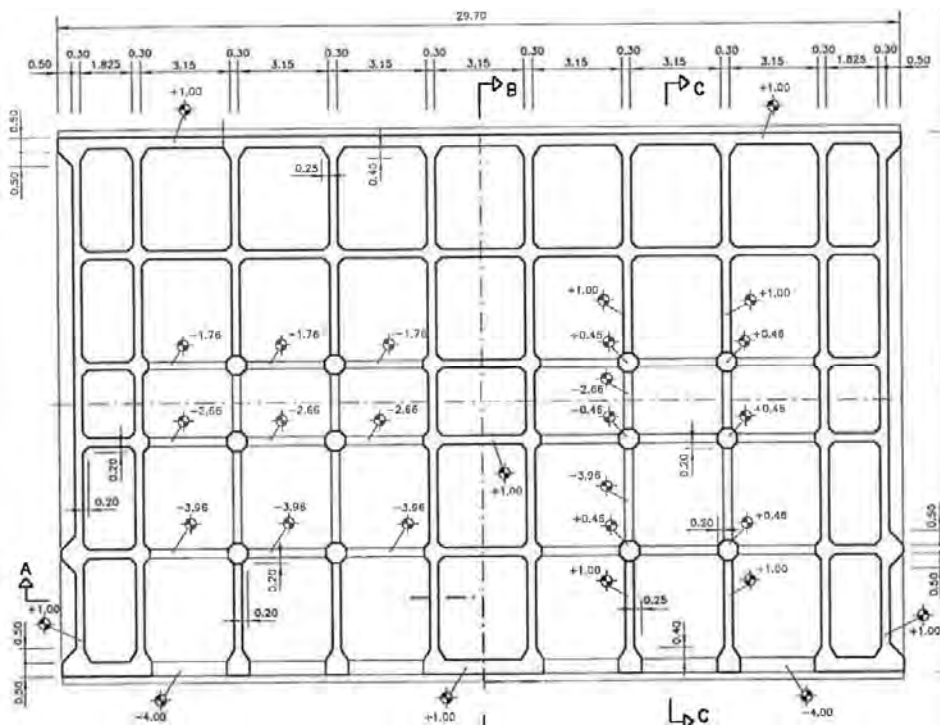


Figura 2.12. Vista en planta del cajón antirreflejante para el muelle 28 del Puerto de Hayovel (Israel, 2001)

En España también se han llevado a la práctica varias aplicaciones de diques y muelles AR, parte de ellas recopiladas por Negro et al. (1999).

En el Puerto de Bilbao, el Testero del espigón nº 2 se construyó en los años 1984 y 1987 con tipología de cajón de 3 celdas coronando a la -1,75 m. De las dos alineaciones que lo componen, la Sur presenta una geometría de cajones de 33,22 m de longitud y 10,25 m de puntal con cota de coronación a la +1,75 m. cuya superestructura está situada sobre dos hiladas de celdas horizontales de 3,6 m de diámetro y 3,80 m de separación entre ejes, que se disponen desde la cota

superior del cajón hasta el macizo de coronación. En el interior de estas celdas horizontales se incluye un talud de escollera que contiene el pedraplén del trasdós de los cajones (Fig. 2.13 y Fig. 2.14).

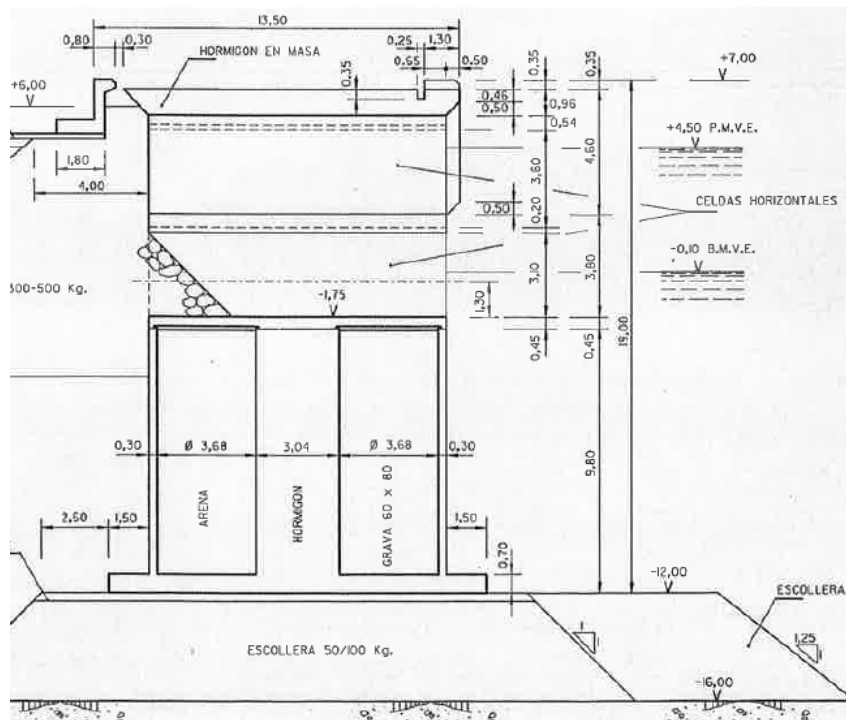


Figura 2.13. Sección transversal testero Sur (espigón nº 2) del Puerto de Bilbao (1987)



Figura 2.14. Vista aérea del testero Sur (espigón nº 2) del Puerto de Bilbao (1987)

En el Puerto de Algeciras, se realizó el proyecto de muelle y explanada junto a Isla Verde (2010), donde se diseñaron tres tipos de cajones antirreflejantes, dos para muelle de 4 y 5 celdas de manga y uno para dique de cinco celdas de manga (Fig.2.15).

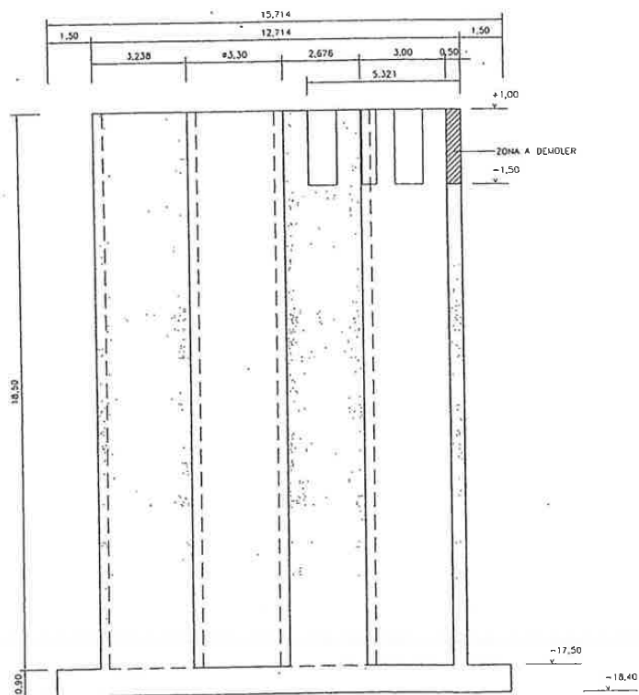


Figura 2.15. Sección transversal del cajón tipo muelle del Puerto de Algeciras (2010)

El cajón tipo muelle es de cuatro celdas de manga de las que las dos primeras filas están todas comunicadas entre sí. En el interior de las de las se deja un talud de escollera de 250-500 kg. Las ventanas son rectangulares con una altura de 2,5 m y 1,9 m de ancho. Las aberturas interiores entre celdas son de 1,0 m. Otro de los cajones tipo utilizados para la construcción de este dique tiene la

particularidad de ser antirreflejantes por ambos lados del mismo y de forma simétrica. El ancho de la cámara es de aproximadamente 7,0 m (Fig. 2.16).

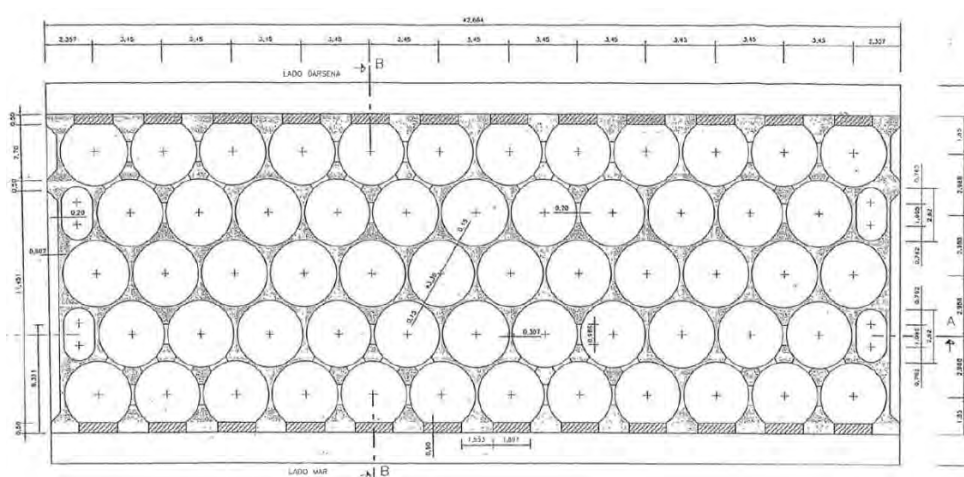


Figura 2.16. Planta del cajón tipo dique del Puerto de Algeciras (2010)

En el Puerto de Carboneras, Almería, una tipología similar se proyectó sobre cajones de celda rectangular para el muelle de Ribera I (2009). Las ventanas de la pared frontal son de altura 5,5 m y 0,67 m de ancho, quedando cegadas en la parte de donde coincide con la defensa (Fig. 2.17).

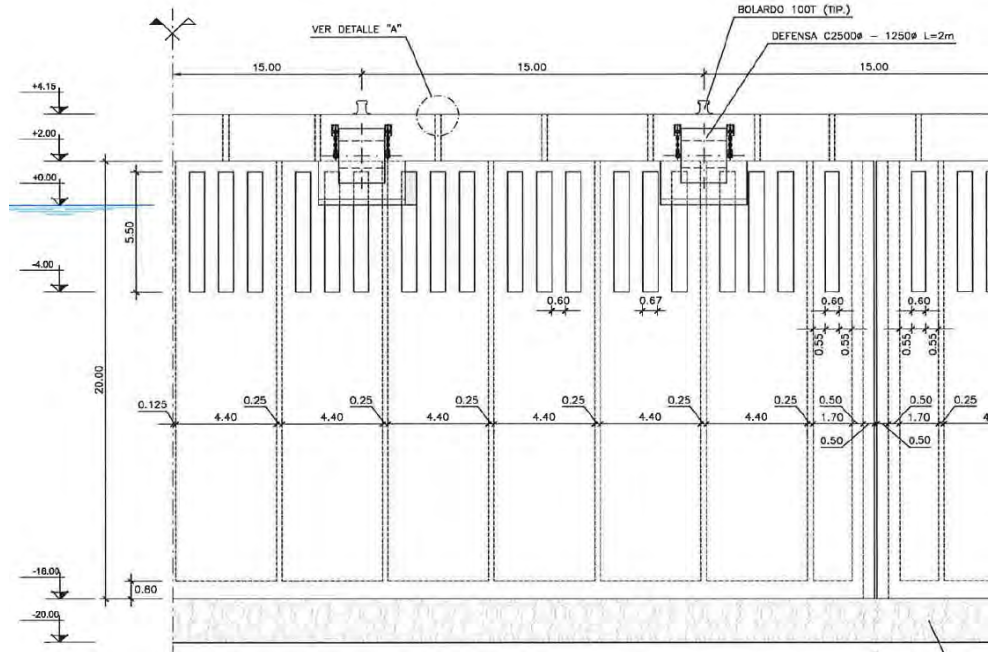


Figura 2.17. Frontal del cajón tipo del muelle de la Ribera en el Puerto de Carboneras, Almería (2009)

Además, cuenta con tubos de salida de aire ocluido de 3,0 m de diámetro atravesando la superestructura. En planta, las dos primeras filas de celdas están comunicadas, con una anchura total de cámara de unos 7,0 m. La forma constructiva es por demolición de las paredes una vez el cajón se ha construido (Fig. 2.18).

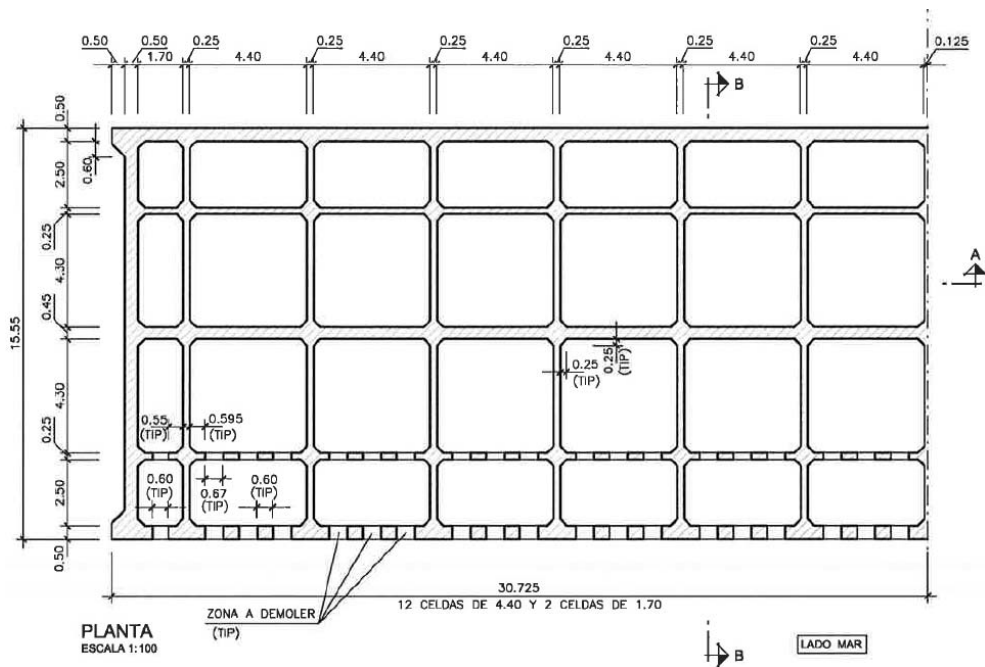


Figura 2.18. Planta del cajón tipo del muelle de la Ribera en el Puerto de Carboneras, Almería (2009)

China también es ejemplo de aplicación de cajones perforados completos con 4 por 3 celdas, perforados los frontales de las 3 primeras interconectadas transversalmente mediante ventanas rectangulares (Jianjy, 1992).

En cuanto a las estructuras con pared curvada, éstas introducen una ligera diferencia con respecto de las de pared vertical; son de aplicación en zona de costa con fuertes oleajes, ya que esta geometría permite la descomposición de las fuerzas del oleaje en una componente horizontal y otra vertical, que favorece la estabilidad del cajón en su conjunto. El primer dique de cajones con cámara de frontal curvado fue construido en 1984 en el puerto de Funakaba, Japón (Fig.

2.19). La cámara curva, de 7,0 m de radio, fue prefabricada mediante pretensado del hormigón y colocado posteriormente sobre el cajón.

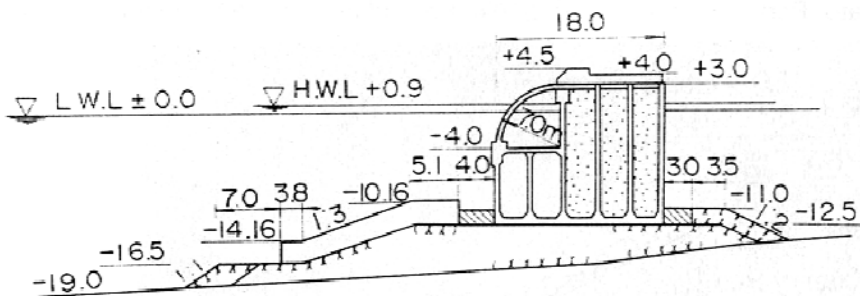


Figura 2.19. Sección de dique con cámara de frontal curvado, Puerto de Funakawa (Japón, 1984)

Otras variaciones de esta tipología es la del cajón semicircular, que posee una gran estabilidad y puede ser también aplicado a la protección de costas de la erosión. El primer dique construido en el mundo con este diseño fue el del Puerto de Miyazaki (Japón, 1993) (Fig. 2.20).



Figura 2.20. Dique con cajón semicircular, Puerto de Miyazaki (Japón, 1993)

El concepto de dique con cámara cilíndrica vertical se desarrolló para aplicarse en zonas de mucha profundidad donde los esfuerzos a los que se ve sometida las estructuras son grandes. Constan de numerosas cámaras cilíndricas de frontal perforado que están alineadas a lo largo de un dique. Dentro de las

cámaras cilíndricas existen algunas variedades ideadas para producir una mayor reducción de las fuerzas sobre el dique y evitar la corriente longitudinal. El cajón ranurado de cámara semi-circular es un ejemplo de este tipo de estructura capaz de reducir en un 60 % la fuerza de impacto de la ola.

En el puerto de Tanger, al objeto de dar una alternativa a la solución de dique en talud para el nuevo dique exterior del Puerto, de 2 km de longitud, se construyó (1997) un tipo de dique ARJ de cámaras curvilíneas perforadas en parte superior a modo de ventanas (Fig. 2.21).

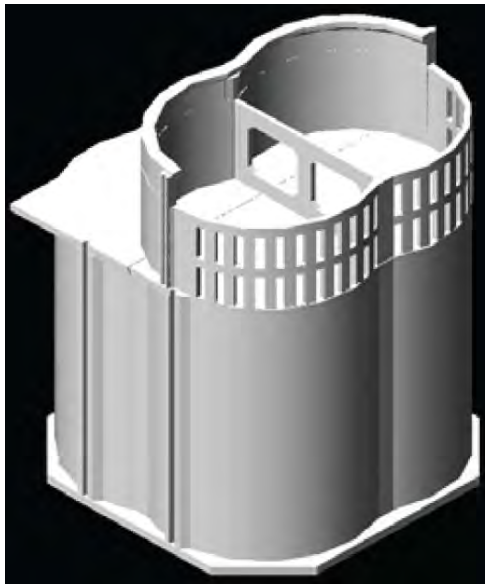


Figura 2.21. Tipología simulada del Puerto de Tánger (Marruecos, 1997)



Figura 2.22. Vistas del dique exterior del Puerto de Tánger (Marruecos, 1997)

En el Puerto de Beirut Sea Front (Líbano) se realizó en 2004 una estructura marítima ARJ al objeto de reducir el rebase del oleaje sobre la estructura y cuyas características son la de poder albergar en su parte superior un paseo. Se trata de dos cámaras de disipación, una exterior de porosidad del 50% y otra, interior de porosidad del 30%, ambas ranuradas (ver Fig. 2.22 y Fig. 2.23).

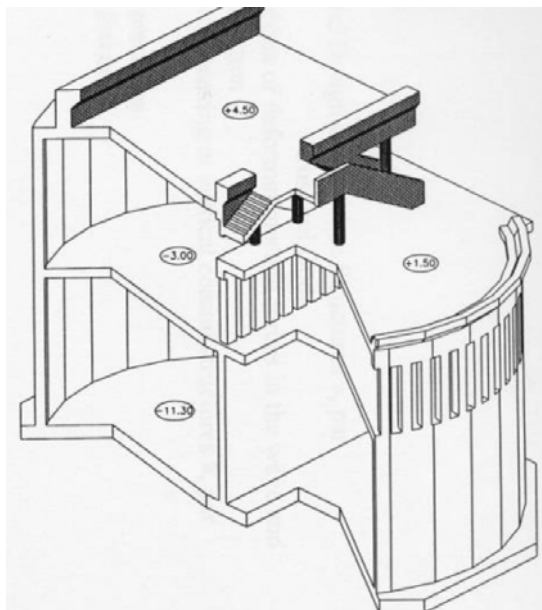


Figura 2.23. Sección transversal del dique del Puerto de Beirut (Líbano, 2004)



Figura 2.24. Vista del dique-mirador del Puerto de Beirut (Líbano, 2004)

2.3.2. Otras Tipologías Antirreflejantes

La mayoría de estructuras marítimas derivadas de las de tipo Jarlan la atenuación de la reflexión en los fenómenos de disipación de energía por turbulencia y fricción generada en la pared permeable y, sobretodo, la reducción de la reflexión por disipación de energía mediante el proceso de superposición de trenes de oleaje incidentes y reflejados con diferente ángulo de fase, sentido de propagación y dirección en su caso. Sin embargo, además de las estructuras marítimas ARJ, existen otras variantes que se muestran a continuación normalmente asociadas a patentes de invención.

Entre las patentes españolas que pueden considerarse de aplicación directa a la adaptación de los muelles de cajones, se describen las cuatro siguientes:

1. El “Dique rompeolas” ES2232248 (Polimón, 2002) consiste en al menos dos pantallas paralelas (1) y (2), a base de una pluralidad de cilindros huecos (3),

siendo los cilindros de la pantalla interior (1) lateralmente adyacentes, estableciendo un cierre total o mayoritario al paso del agua, mientras que los cilindros de la pantalla exterior (2) están sensiblemente distanciados, definiendo aberturas (4) que permiten el paso del agua a su través. Los cilindros de la pantalla trasera se unen a los de la pantalla delantera mediante riostras. Los cilindros se fijan en el fondo marino mediante pilotes respectivos, pudiendo ser una solución adecuada para fondos poco competentes (Fig. 2.24).

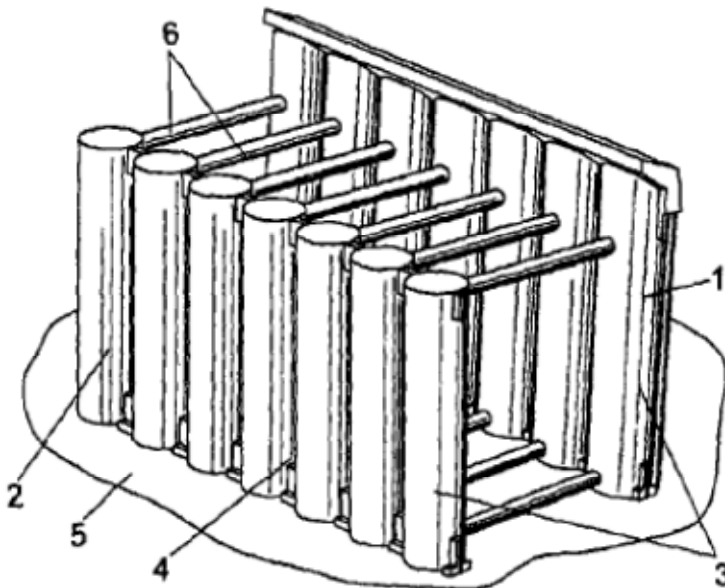


Figura 2.25. "Dique rompeolas" ES 2232248 (2005)

2. La "Estructura de baja reflexión" ES2262405 (Esteban y Llamas, 2006) que desarrolla la idea de un cajón de condiciones de baja reflexión mediante la disposición de ranuras en su paramento exterior que comunican las aguas libres con cámaras y conjuntos de cámaras de disipación (Fig. 2.25).

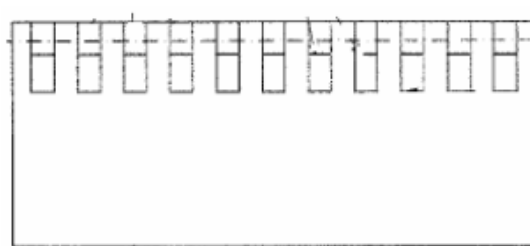


Figura 2.26. "Estructura de baja reflexión" ES 2262405 (2006)

3. El "Dique antirreflejantes de cámaras cilíndricas" WO2008062087 (Garrido et al., 2008), aplicable a diques verticales y a muelles portuarios y similares que tienen por objeto reducir la reflectividad o el oleaje en un amplio rango de frecuencias. Se estructura básicamente a partir de un cajón (5) prefabricado formado por celdas (11, 12, 13, 14 y 15) en donde al menos una fila de ellas (11) se transforma en cámaras prismáticas (1) con una dinámica de llenado/vaciado rotatorio, diferente de la dinámica de llenado/vaciado típicamente Jarlan de la cámara abierta (Fig. 2.26 y 2.27).

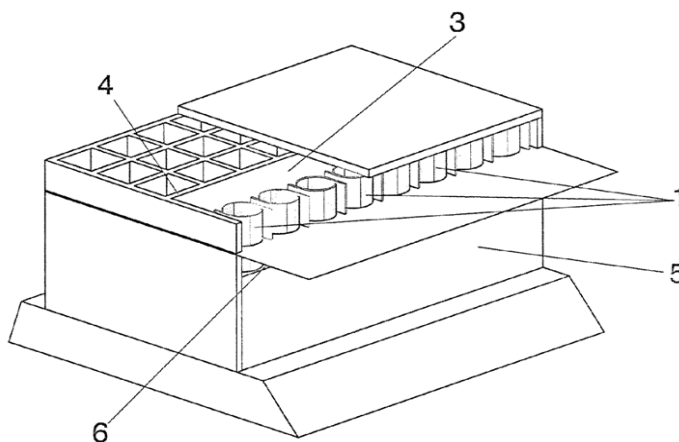


Figura 2.27. Vista 3D del Dique antirreflejantes de cámaras cilíndricas WO2008062087 (2008)

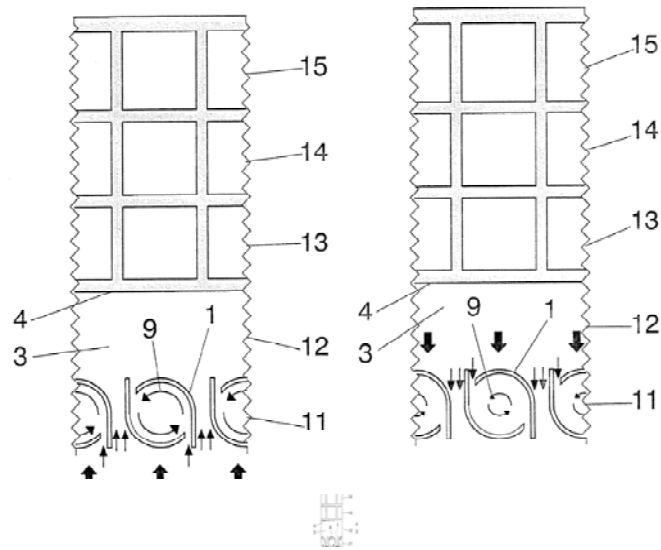


Figura 2.28. Esquema del fenómeno del “Dique antirreflejante” de cámaras cilíndricas WO20080622087 (2008)

4. La “Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje” (Medina et al. 2009) permite superar la ineficacia que las estructuras marítimas antirreflejantes existentes tienen frente a las ondas de baja frecuencia, derivada del hecho de que si el tiempo de ida y vuelta del flujo entre el paramento frontal y el trasero es mucho menor que la mitad del periodo de la onda incidente, no existe interferencia significativa entre reflexiones. La tipología propuesta por consiste en que las diferentes cámaras de disipación se extienden horizontalmente formando recorridos de celdas a lo largo de diferentes direcciones (A, B, C, D) permitiendo una extensión del recorrido de la circulación del flujo inducido por el oleaje, y aumentando así la eficacia antirreflexiva frente a las frecuencias más bajas (Fig. 2.28).

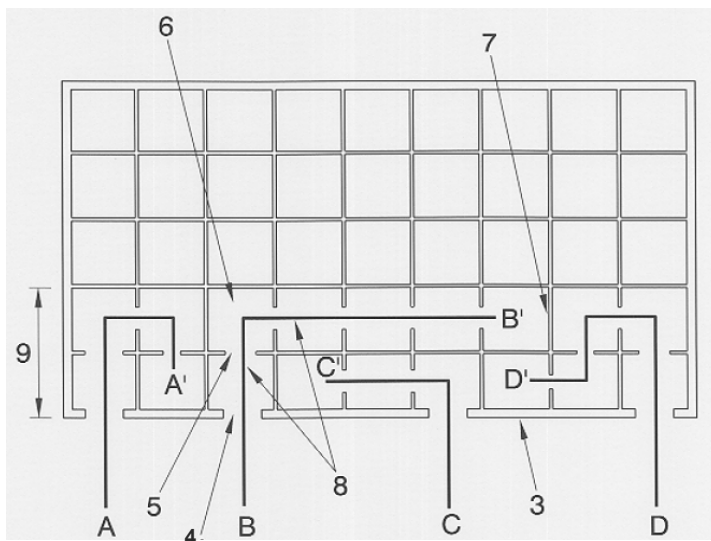


Figura 2.29. Forma en planta de "Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje" ES200931049 (2009)

Entre las patentes internacionales, cabe destacar las invenciones japonesas en este campo. En el documento de patente JP2002275855 (Shimatani et al., 2002) se muestra una estructura vertical de muelle de bloques en la que se aplica también el concepto de estructura marítima ARJ con la variante de que la atenuación de la reflexión del oleaje se realiza en una dirección transversal en vez de perpendicular al paramento vertical (Fig. 2.29). La propia forma de los bloques permite que la cámara de disipación en vez de extenderse en la dirección perpendicular al paramento frontal de la estructura vertical, en el que incide el oleaje a atenuar, se extiende con cierta inclinación respecto a éste.

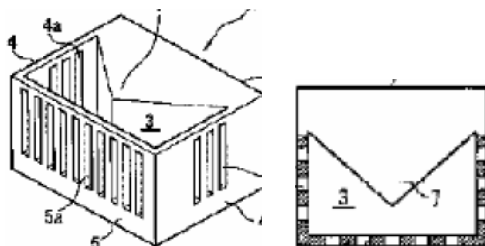


Figura 2.30. "Wave dissipating caisson and wave dissipating structure" JP2002275855 (2002)

Otras tipologías patentadas mayoritariamente en Japón no tienen fácil el cumplir una serie de criterios de funcionalidad y adecuación a procesos constructivos que no supongan una modificación de los actuales y, por tanto, un sobre coste excesivo. Algunos ejemplos se muestran en las Figuras 2.31 a 2.36.

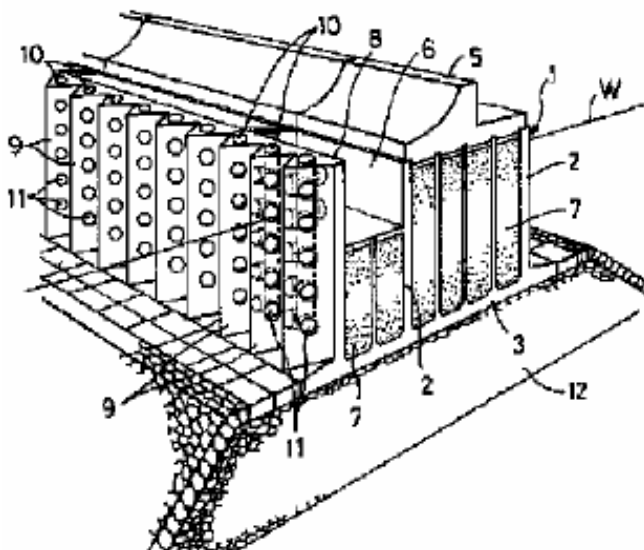


Figura 2.31. "Waves-breaking type caisson and breakwater therewith" JP6002316 (1994)

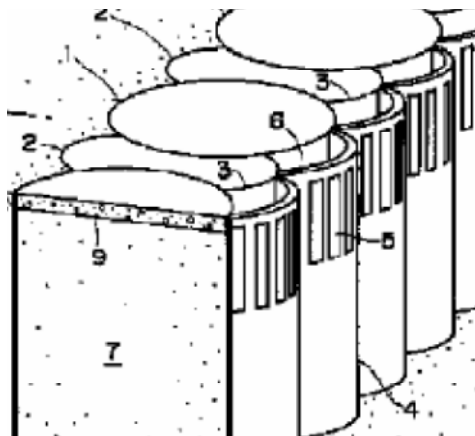


Figura 2.32. "Wave dissipating cell structure" JP10168851 (1998)

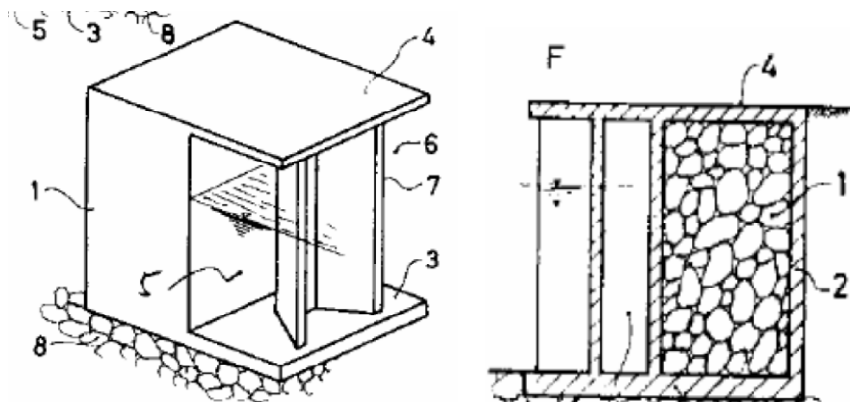


Figura 2.33. "Separating and combining type breakwater revetment" JP58000508 (1983)

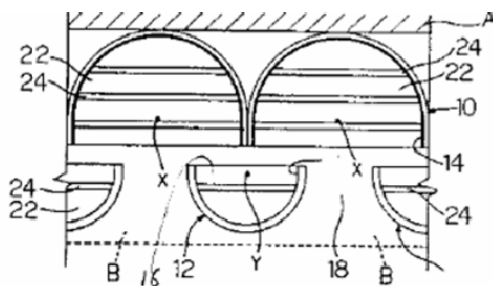


Figura 2.34. "Breakwater structure" JP62055309 (1987)

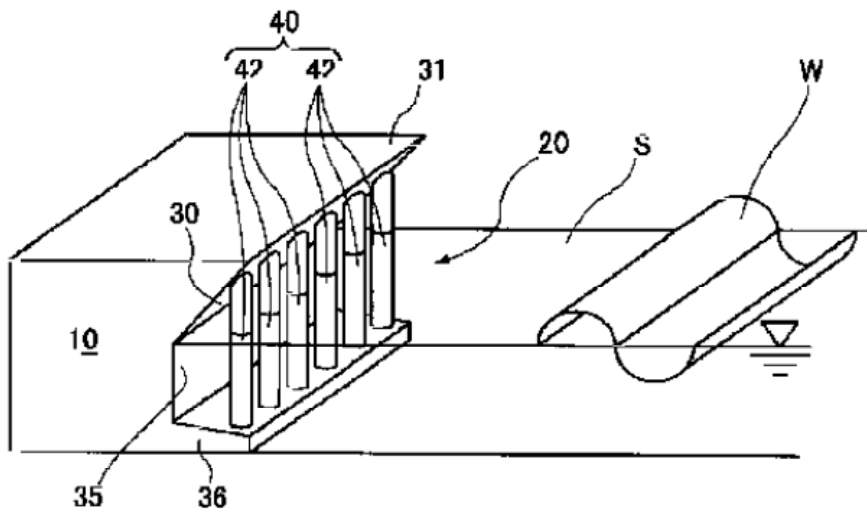


Figura 2.35. "Breakwater structure" JP2000319839 (2000)

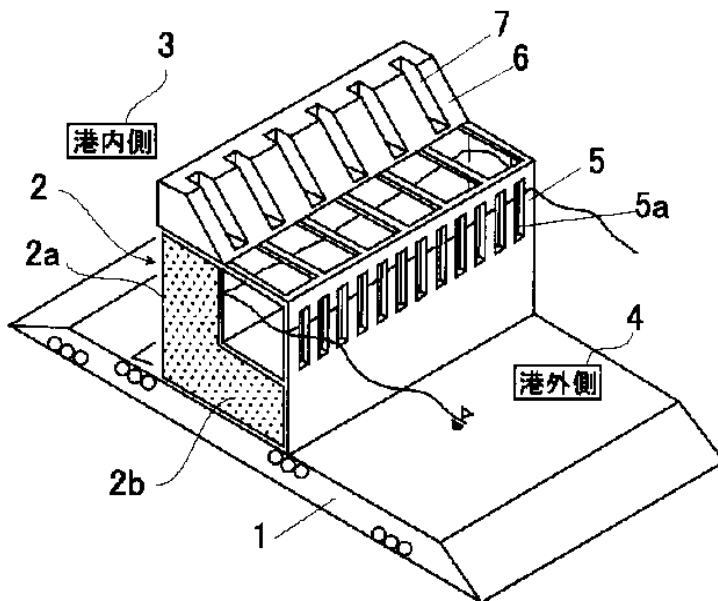


Figura 2.36. "Wave dissipation caisson" JP2002309540 (2002)

Otros diques perforados especiales fueron propuestos por Ijima et al. (1976) y Onishi and Nagai (1979). Ikeno (1988) propuso una mejora tecnológica de los diques tipo Jarlan presurizando la cámara de manera que se pudiese controlar el modo de resonancia de la misma al objeto de amortiguar el periodo de cada ola. El tipo cajón tipo caja tiene aberturas tanto en el frontal como en la base (Yip and Chwang, 2000).

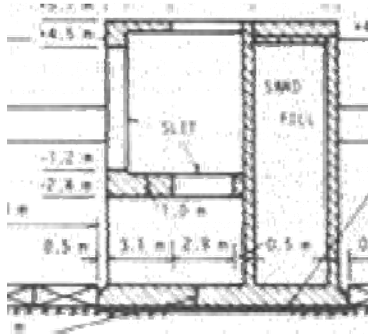


Figura 2.37. Sección de dique tipo caja, Puerto de Osaka (Japón)

Sekiguchi et al. (2001) presentó un nuevo tipo de dique que combina las ventajas del dique de cámara ranurada y frontal inclinado abierto por arriba. (Fig. 2.38). Se trata de un dique de 1500 m de longitud construido a una profundidad de 10 a 11 m en el Puerto de Niigata (Japón). La mayor atenuación de energía de esta tipología con respecto a la cámara con pared ranurada vertical es la diferencia de fase entre el oleaje fuera de la cámara y las fluctuaciones de nivel dentro de la cámara.

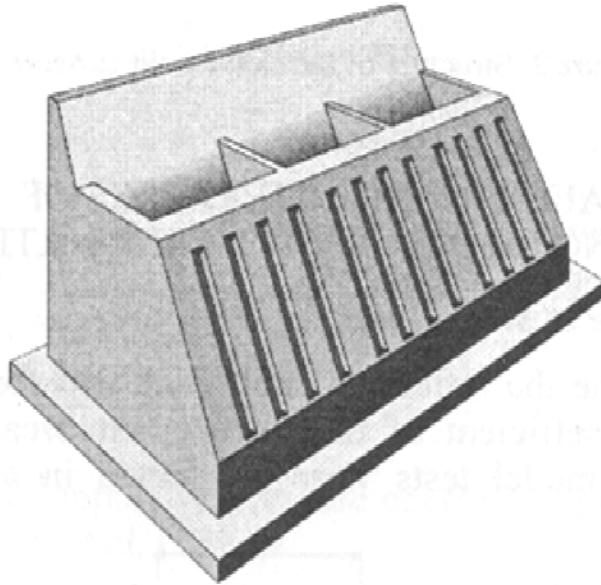


Figura 2.38. Sección de dique con cámara frontal inclinado, Puerto de Niigata (Japón, 2001)

La colocación de pantallas delante de la pared vertical existente, sujeta mediante anclajes a la pared, al cimiento o con otro procedimiento, ha sido escasamente aplicada en el diseño de diques reales, aunque sí en absorbedores de oleaje para canales de ensayos en laboratorio o para el desarrollo de modelos numéricos (ver Losada et al., 1993 y Two and Lin, 1991).

Otros intentos han consistido en la reducción de la reflexión de los diques verticales realizando modificaciones en los espaldones (Juhl, 1994 y Canel, 1994). A modo ilustrativo, se muestra el diseño propuesto para el dique exterior del Puerto de Castellón, en el que el espaldón se incorpora como parte del sistema antirreflejante (Fig. 2.39).

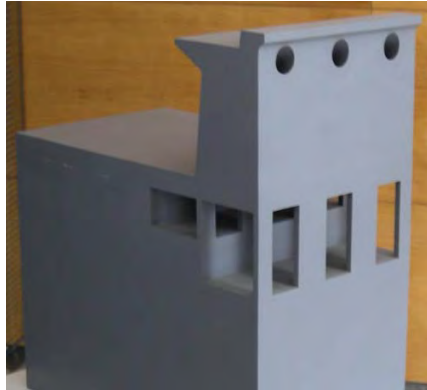


Figura 2.39. Vista de la maqueta del dique antirreflejantes en el Puerto de Castellón (2010).

Otras tipologías antirreflejantes son las formadas por piezas prefabricadas, preferentemente, para muelles. Las piezas prefabricadas se colocan en una fila y en varias columnas hasta la altura requerida, delante y encima del cajón impermeable, formando una cámara perforada. Existen algunas tipologías diferentes de piezas prefabricadas a tal efecto, entre las que se encuentran las denominadas como IGLOO (Shiraishi et al., 1976), WAROCK (Ijima et al. 1976), BARA (Berenguer et al., 2003), ARPA (Garrido et al. 2008) y GMAR (Medina et al. 2008). Este tipo de pared permeable tiene características similares en la capacidad absorbente de la onda que la estructura marítima ARJ, aunque el mecanismo de disipación de la energía es diferente en algunos aspectos, no siendo objeto de esta Tesis Doctoral.

Por último, se muestra una tipología utilizada en la reconstrucción del distrito central de Beirut, Líbano (1994), descrita por Greslou (1972), que conjuga ideas semejantes a las técnicas japonesas WAROCK e IGLOO y donde la amplitud

de la cámara se situaba en $0.25 \times L$, la ranura en $L/14$ y el ancho en eslora en el entorno de $L/9$ (Fig. 2.40 y Fig. 2.41).

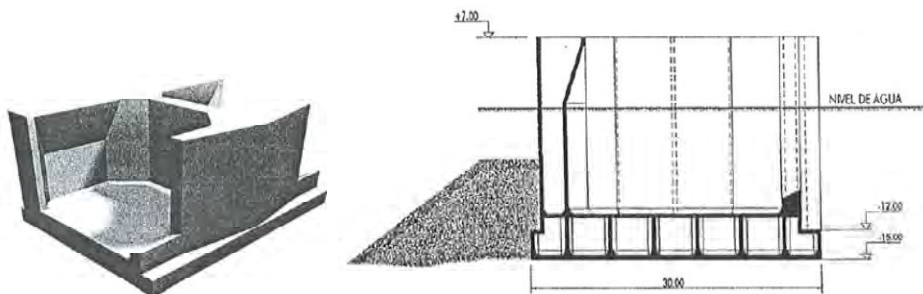


Figura 2.40. Estructura antirreflejante tipo ARC en el Puerto de Beirut (Líbano, 1994).

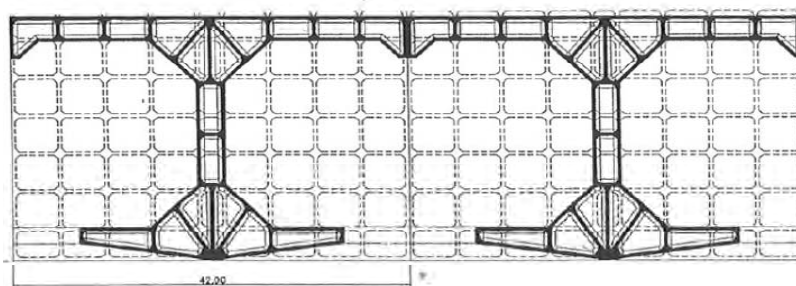


Figura 2.41. Forma en planta del cajón tipo ARC en el Puerto de Beirut (Líbano, 1994).

2.4. Fenómenos hidrodinámicos en estructuras marítimas ARJ

2.4.1. Modelación física

Los modelos físicos son siempre una alternativa fiable para conocer el comportamiento hidráulico de una estructura marítima de características antirreflejantes. Algunos autores han llegado a resultados empíricos a partir de los experimentos o han comparado los resultados teóricos con los experimentales. A

continuación, se describen algunos de los estudios empíricos basados en ensayos físicos a escala reducida.

El primer estudio experimental propiamente dicho se debe a Jarlan (1961) quien ensayó a escala 1:30 el cajón de una cámara y pared frontal perforada con orificios equidistantes y porosidad $m = \sigma_p / \sigma_u = 0.49$, siendo σ_u el área no perforada y σ_p el área perforada; por lo que, si se considera el índice de porosidad como la relación entre el área perforada y el área total, la porosidad en estos ensayos es $p\% = 67\%$. En estos ensayos, la profundidad de agua es igual dentro y fuera de la cámara, cuya anchura es igual a la profundidad de agua, siendo aproximadamente de 10 m. en escala de prototipo (Fig. 2.3). La sección de la cámara perforada queda definida por una anchura y un espesor de pared y en ella estudia la pérdida de energía de la partícula de agua causada por la fricción a su paso de la posición M_1 a la posición M_2 (Fig. 2.42).

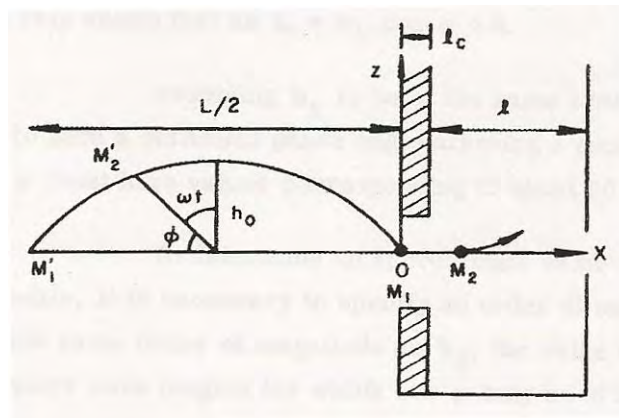


Figura 2.42. Definición de sección de cámara antirreflejante tipo Jarlan (Jarlan, 1965)

Como resultado de estos ensayos Jarlan comprobó que la componente horizontal de la velocidad de la ola se reduce en gran parte al pasar a través de los

orificios y concluyó que la elección del ancho efectivo de cámara depende del peralte máximo de la ola.

Marks and Jarlan (1968) realizaron ensayos con oleaje regular e irregular para estudiar las fuerzas sobre un modelo ARJ a escala 1:45 y los efectos sobre la erosión a pie de dique. El fondo del canal de oleaje disponía de una pendiente 1:16 y la profundidad de agua en la zona del modelo era de 30 cm [13.7m en escala de prototipo (ep)]. Se practicaron orificios en la pared frontal de 2.7 cm de diámetro [1.2m ep], al igual que el espesor de esta pared. El ancho de la cámara era de 27 cm [12m ep], aproximadamente.

Los resultados presentados muestran que la reducción de las fuerzas sobre el modelo es mayor en olas de periodo menor y la disipación de energía es aproximadamente del 65%. También observaron que se reducía la erosión producida en la base del cajón apoyado sobre fondo de arena para el caso de oleaje regular.

Terrett et al. (1968) realizaron un ensayo de modelo a escala 1/48 del dique propuesto para el puerto deportivo de Sussex (England) que estaba compuesto de una base sólida hasta el nivel de bajamar y una cámara superior con pared frontal perforada con $p\%=31\%$, con dos anchos de cámara distintos para diferentes valores de altura y periodo regulares. En el ensayo midieron el coeficiente de reflexión (CR) como $CR=(a-b)/(a+b)$, donde a y b son, respectivamente, el nodo y el antinodo de las olas. También midieron la fuerza del oleaje y lo compararon con los resultados obtenidos en un dique vertical impermeable. Ensayaron con oleaje regular de periodos entre 1s y 1.9 s [7s y 10s ep] y alturas hasta 14 cm [6.7m ep], de incidencia normal y oblicua de 45°, resultando que la reflexión es menor que en el caso de incidencia normal y que,

dada la dificultad para obtener condiciones estables debido a la re-reflexión de las olas reflejadas en el canal de ensayos, sólo se puede concluir que el coeficiente de reflexión muestra sensibilidad al periodo. También realizaron ensayos para estudiar la estabilidad de la banquetta bajo el cajón.

Sawaragi and Iwata (1979) realizaron ensayos físicos con oleaje irregular en un canal de dimensiones (m) 30x0.7x0.95. La pared perforada de la cámara tenía un espesor de 0.8 cm con un diámetro de orificios de 1.4 cm., profundidad de agua de 25 cm y porosidad $p\%=18.6\%$. Los anchos de cámara son variables desde $B=0$ a $B=82$ cm. Los oleajes ensayados fueron en modelo $H_{1/3} = 2.05$ cm y $T_{1/3} = 0.70$ s, $H_{1/3} = 2.73$ cm y $T_{1/3} = 0.78$ s. Los resultados muestran un mínimo en la amplitud de onda reflejada en torno a 0.2 veces el ancho relativo de la cámara (B/L) siendo B =ancho de cámara y L = longitud de la onda.

Tanimoto y Yoshimoto (1982) investigaron experimentalmente y analizaron el comportamiento de la reflexión en cajones parcialmente perforados. Como resultado de su trabajo recomendaron un rango para la porosidad de la pared frontal de $15\% < p\% < 30\%$ y un ancho relativo de la cámara en el rango de $0.10 < B/L < 0.20$ para un mayor efectividad disipativa.

Jianyi (1992) realizó ensayos de modelo sobre un diseño de dique-cajón perforado a escala 1:29. La superestructura es un espaldón y la subestructura un cajón perforado colocado sobre 8,6 cm [2.5m ep] de escollera a una cota de -34,5 cm [-10 m ep], como se muestra en la Figura 2.43.

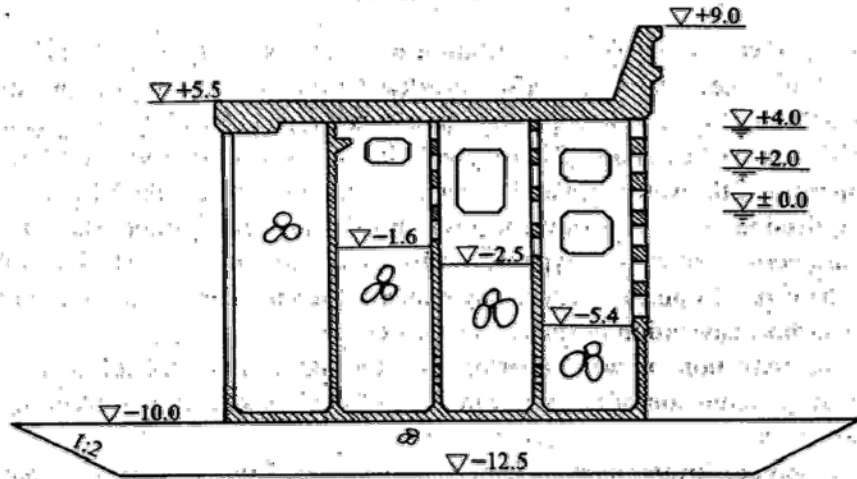


Figura 2.43. Sección transversal del dique-cajón ensayado por Jianyi (1992)

El cajón tiene cuatro filas de celdas en la dirección transversal y tres filas de celdas en la dirección longitudinal. Las primeras tres filas de celdas transversales sirven como cámaras de absorción de oleaje, las cuales son conectadas entre sí mediante agujeros rectangulares de 3.4cmx4.8cm [1.0mx1.4m ep] colocados en la parte superior y media de las paredes, la porosidad es $p\%=24.3\%$. En la dirección longitudinal, todas las primeras filas tienen 3.4cmx4.8cm [1.0mx1.4m ep] de agujeros en la posición alta (24 en total) y 1.0cmx4.8cm [0.3mx1.4m ep] las de la posición baja (12 en total), con una porosidad $p\%=18.63\%$. Las segundas filas de la dirección longitudinal tienen 3.1cmx4.8cm [0.9mx1.4m ep] de agujeros en la posición alta (24 en total) y 1.0cmx4.8cm [0.3mx1.4m ep] en las de la posición baja (12 en total), con una porosidad $p\%=17\%$. Las terceras filas de dirección longitudinal tienen agujeros alternados en la dirección vertical. Además, cada celda es rellena por escollera a diferentes niveles, formando una escalera (Fig. 2.44).

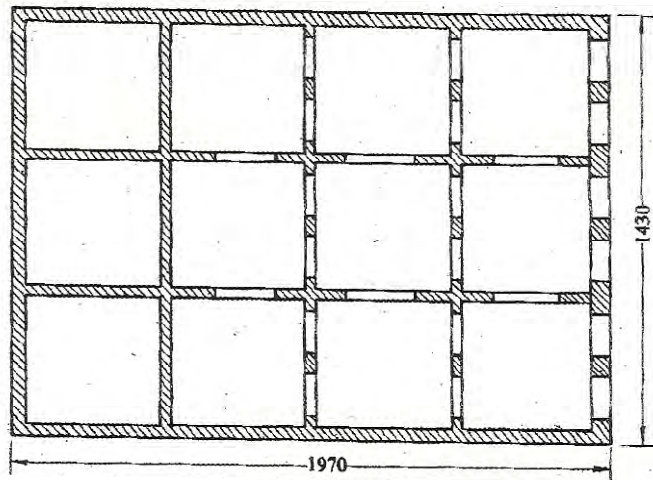


Figura 2.44. Planta de dique-cajón ensayado por Jianyi (1992)

Los experimentos fueron llevados a cabo en un canal de dimensiones (m) $63 \times 1,8 \times 1,8$. El canal se dividió en dos partes (una de 60 cm y otra de 120 cm) para poder medir el oleaje incidente que realmente atacaba el dique. La escala de modelo fue 1:29 y se ensayaron modelos perforados y modelos no perforados con tres formas distintas de superestructura. La profundidad de agua de $h(\text{cm}) = 34.5, 41.4$ y 48.3 [$10, 12$ y 14m ep] y características del oleaje regular $3.9 < H(\text{cm}) < 20.8$ y $T(\text{s}) = 1.0, 1.6$ y 2.2 [$1.13 < H(\text{m}) < 6.03$ y $T(\text{s}) = 5.4, 8.6$ y 11.8 ep]; mientras que el oleaje irregular fue generado con espectro tipo JONSWAP, parámetro $\gamma = 3.3$. El método de separación de oleaje incidente y reflejado usado fue el “2-point” (Goda et al., 1976) para el oleaje regular y un “3-point method” (Mansard and Funke, 1987) para el caso de oleaje irregular. Los ensayos con

oleaje regular e irregular demostraron que el dique-cajón perforado tiene ventajas de bajo coeficiente de reflexión, absorción del oleaje, disminución de la altura de ola y del rebase. Se obtienen CR inferiores en oleaje irregular para características del oleaje equivalentes al regular.

Bergmann and Oumeraci (2000) compararon resultados de reflexión con diques de una sola cámara y cajones multi-cámara y comprobaron la reducción de fuerzas de la estructura. Los ensayos se realizan en el canal de Hanover de dimensiones(m) 320x5x7. Las porosidades de las paredes perforadas para una sola cámara fue $p\% = 0, 11, 20, 26.5$ y 40.5 %. Los anchos de cámara en escala de prototipo fueron $B = 4.8$ m y 7.8 m. Para cajón multi-cámaras, las porosidades fueron $p\% = 26.5\%, 20\%, 11\%$ para la primera, segunda y tercera pared delantera de cada cámara, respetivamente. El ancho total de la cámara fue $B = 15$ m. Los casos de oleaje ensayados fueron, en escala de modelo, para oleaje regular $0.5 < H(m) < 1.5$ m y $4.5 < T(s) < 12.0$ y para oleaje irregular $0.5 < H_s(m) < 1.25$ y $4.5 < T_p(s) < 12$. La profundidad del agua $h(m) = 3.25, 4$ y 4.75 m. Se utilizó el método Mansard and Funke (1987) para el estudio de la altura de ola incidente y de la reflexión de la misma, resultando que el cajón multi-cámara es capaz de reducir el coeficiente de reflexión para un rango mayor de frecuencias que con una sola cámara, lo que se ve correspondido en la reducción de las fuerzas sobre la estructura.

Zhu and Chwang (2001) realizaron experimentos físicos con el objetivo de verificar sus resultados analíticos. Los ensayos se llevan a cabo en un canal de dimensiones(m) 12x0.3x0.45 sobre un modelo ARJ de una sola cámara con frontal ranurado y posicionado a diferentes profundidades (Fig. 2.45).

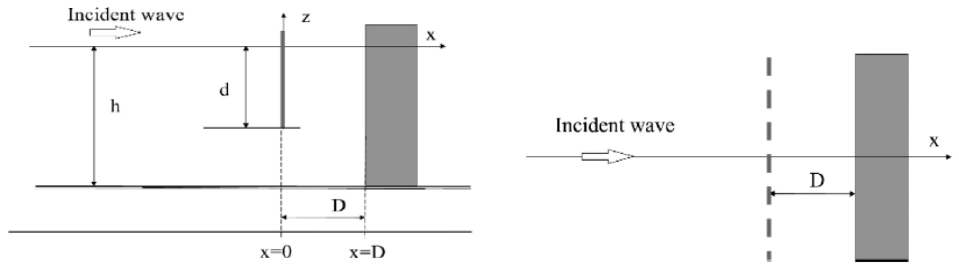


Figura 2.45. Esquema de sección(izq) y planta(der) del modelo ensayado por Zhu and Chwang (2001)

Los ensayos de oleaje regular tienen de $H = 3$ cm y $0.5 < T(s) < 1.0$. El ancho de la cámara varía entre 2.4 cm. y 48.4 cm. El método utilizado para la obtención del CR es el *Transfer Function Method* desarrollado por Zhu (1999) para oleaje regular. Los resultados obtenidos muestran que el CR es mínimo en torno a 0.2 veces el ancho relativo de la cámara (B/L) y aumenta conforme disminuye la profundidad de inmersión de la pared ranurada.

Kitamura (2001) estudió los diques de doble cámara ranurada y las diferencias con los de una cámara y con el dique mixto compuesto de bloques y cajón impermeable, tanto en la reducción de la reflexión como de las fuerzas sobre la estructura. Hizo ensayos con oleaje regular para dos cámaras y para bloques y de oleaje irregular para una cámara con $0.5 < H_{1/3}(m) < 2.0$ y $3.0 < T_{1/3}(s) < 6.0$. Los resultados mostraron que el cajón de doble cámara reduce la reflexión tanto para periodos largos como para cortos con la ventaja de que la ocupación de espacio es menor que en el caso del dique mixto.

Dhinakaran et al. (2002) llevo a cabo ensayos físicos para estudiar el comportamiento hidráulico de una tipología de dique de abrigo consistente en un dique mixto de cajón semicircular sobre escollera. Los ensayos fueron hechos para cajón perforado y no perforado y, además de la medida de la reflexión, se

midieron presiones. También evaluó la influencia que la profundidad y la porosidad tienen en la disipación de la energía del oleaje incidente. Para ello, realizaron ensayos de oleaje regular sobre modelo de cámara circular de 0.5 m de radio con orificios de 15 y 20 mm de diámetro y distancia de 50 mm entre centros, resultando uno de los modelos con una porosidad $p\%=7\%$ y el otro con una porosidad $p\%=11\%$. Los resultados del CR, estimado con el método de Mansard and Funke (1981), mostraron una reducción del CR con el aumento de porosidad y disminución de h/L , donde h es la profundidad y L la longitud de onda. En cuanto a las fuerzas obtuvieron que las fuerzas horizontales son pequeñas comparadas con las verticales y se ven reducidas considerablemente, comparadas con las de un dique vertical, debido a la curvatura de la pared.

Tabet-Aoul and Lambert (2003) realizaron ensayos, en el marco del proyecto europeo PROVERBS, en un canal de dimensiones(m) 25,0x0.8x1.0, con oleaje regular de $1.03 < T(s) < 7.20$ y $2 < H_s(\text{cm}) < 20$ y dos niveles de profundidad de agua, $h_1 = 40$ cm y $h_2 = 50$ cm sobre cajón de una cámara de ancho $B = 54$ cm y perforaciones circulares de 4 cm con una porosidad $p\% = 28\%$. Las medidas de las presiones se realizaron tomando datos por delante y por detrás de la pared frontal perforada y en el interior de la pared posterior. El coeficiente de reflexión se midió tomando los nodos y antinodos fijos observados en el canal. Las fuerzas sobre las paredes se calcularon asumiendo una ley lineal de presiones entre los puntos de medida de los sensores. Como resultado se obtuvo que las fuerzas sobre la estructura se desfazan en función del ancho relativo (B/L) para valores de $B/L > 0.06$ y propusieron un método empírico para el cálculo de máximas fuerzas horizontales desarrollado a partir de los resultados de los ensayos y testado con los datos existentes en prototipo.

Suh et al. (2006) realizó ensayos de oleaje irregular sobre estructura antirreflejante parcialmente perforada y cimentada sobre escollera, en canal de dimensiones(m) 23,0x1.0x1.0, que completan los experimentos anteriormente realizados por Park et al. (1993) para oleaje regular sobre el mismo tipo de modelo (Fig. 2.46).

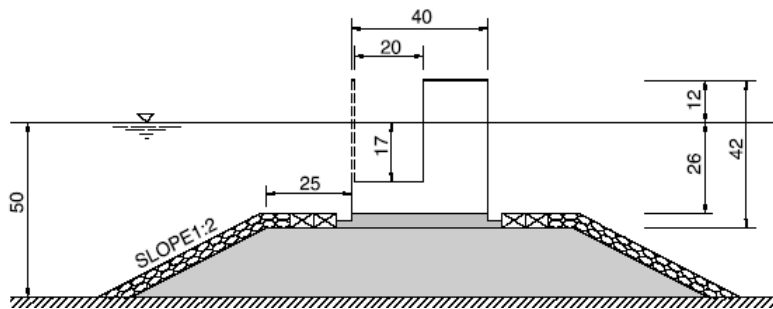


Figura 2.46. Sección del modelo ensayado por Park et al. (1993) y Suh et al. (2006)

El oleaje irregular fue caracterizado según el espectro Bretschneider-Mitsuyasu con dos alturas de ola significantes $H_s(\text{cm})=5$ y 10 y periodos de pico en el rango $1.1 < T_p(\text{s}) < 2.0$. Se ensayaron tres anchos de cámara de $B(\text{cm})=15, 20$ y 25 con una porosidad única $p\%=33\%$. El método usado para la estimación del CR es el propuesto por Suh et al. (2001b). Como resultado de los experimentos, obtienen que el CR depende fundamentalmente del ancho relativo de la cámara B/L_c , siendo L_c la longitud de la onda dentro de la cámara cuya profundidad de agua es menor que fuera, y que tanto para el caso regular como para el irregular el óptimo valor de CR se da para un valor de B/L_c próximo a 0.2 , siendo mayor el valor que toma el CR en el caso de oleaje irregular.

Liu et al. (2008) realizan ensayos físicos con el objetivo de validar su modelo analítico. Los ensayos se realizan en un canal de dimensiones(m) $56,0 \times 0,7 \times 1,0$ para investigar las fuerzas verticales y horizontales a las que está

sometido un cajón vertical cimentado sobre escollera, parcialmente perforado, que salva la diferencia de profundidad fuera y dentro de la cámara mediante la inclusión de escollera hasta un espesor de 20 cm. El cajón estaba formado por una cámara de cuatro celdas cuyos anchos se varían a 15, 20 y 30 cm, con pared frontal perforada con ranuras horizontales de porosidades $p\% = 20\%$ y 40% (Fig. 2.47). Se combinaron oleajes irregulares simulados a partir del espectro tipo JONSWAP, con parámetro $\gamma = 3.3$, periodos $T_p(s) = 0.99, 1.15$ y 1.38 y alturas de ola significativa $H_s(\text{cm}) = 5.3, 6.7$ y 8.0 para dos profundidades de agua $h(\text{cm}) = 20$ y 40 .

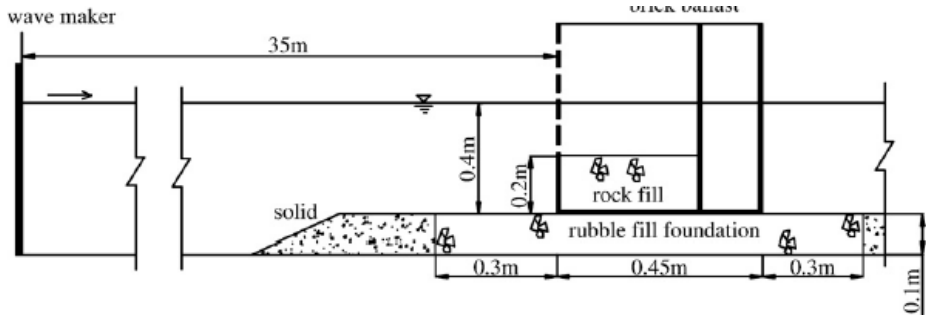


Figura 2.47. Sección del modelo ensayado por Liu et al. (2008)

Kirca y Kabdasli (2009) ensayan un tipo de cajón antirreflejante con dos cámaras en vertical perforadas en la pared frontal con distinta porosidades, $p\% = 0\%, 100\%, 25\%, 40\%$ y 60% (Fig. 2.48). Los ensayos se realizaron en un canal de dimensiones(m) $24,0 \times 1,0 \times 1,0$ para 9 ensayos de oleaje regular con $0.040 < H/L < 0.11$ y $0.26 < h/L < 0.54$ y un ensayo de oleaje irregular con $H_s(\text{cm}) = 7.2$ y $T_p(s) = 1.5$.

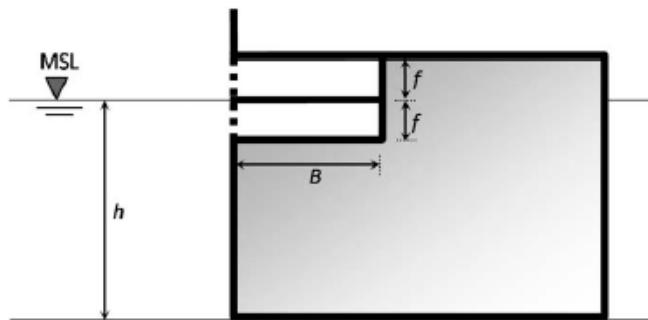


Figura 2.48. Sección ensayada por Kirca y Kabdasli (2009)

Los resultados mostraron que este tipo de estructura es capaz de reducir las fuerzas debidas al oleaje hasta en un 30-40% para un rango de ancho relativo de la cámara entre $0.2 < B/L < 0.3$.

2.4.2. Modelación analítica y numérica

Como en el caso de los modelos físicos, diferentes autores han desarrollado modelos teóricos, tanto analíticos como numéricos, relacionados fundamentalmente con los fenómenos de reflexión del oleaje en estructuras marítimas antirreflejantes y las fuerzas ejercidas por las mismas. Estos modelos, en su mayoría, se fundamentan en la teoría lineal y de ondas y han sido verificados con algunos de los ensayos físicos relacionados en el anterior apartado. A continuación, se presentan los trabajos que se han considerado más relevantes en lo que se refiere al objeto de la presente Tesis Doctoral.

Uno de los primeros estudios que hacen referencia a la reflexión de estructuras marítimas verticales perforadas corresponde a Jarlan (1965) y se basa en aplicar la teoría acústica, que hasta el momento había servido de fundamento para explicar el comportamiento de las ondas en el aire al atravesar paredes

porosas. Al igual que para las ondas acústicas el panel de absorción de sonido debe ser grueso y suficientemente poroso, Jarlan plantea que la longitud de los orificios de la pared perforada de los diques verticales determina la absorción de la ola, a la vez que el ancho adecuado de la cámara.

Kondo (1979) presentó una aproximación analítica para estimar el coeficiente de reflexión y transmisión para diques permeables e impermeables con 2 paredes perforadas de orificios basada en la teoría de onda larga. Para ello, asume la teoría lineal del oleaje, supone que la pérdida de energía es generada por el movimiento horizontal de las partículas de agua a su paso por los poros de la pared perforada y que el espesor de la pared perforada es siempre muy inferior al ancho de la cámara.

Hagiwara (1984) propuso un modelo teórico basado en la teoría lineal para estimar el coeficiente de reflexión y de transmisión de estructuras verticales disipadoras del oleaje. También estudió la influencia de las características estructurales y del oleaje sobre la capacidad de disipación de un dique con pared permeable a ambos lados, mar y tierra.

Two and Lin (1991) desarrollaron una fórmula para estimar el coeficiente de reflexión en una estructura absorbente de oleaje con un número finito de paredes porosas separadas entre sí, con diferentes parámetros de porosidad cada una de ellas. Demostraron que la reflexión del oleaje en un dique perforado se ve muy afectada por la distancia entre paredes, así como por la posición de las mismas. Para valores del oleaje incidente con $1/20 < h/L < 1/2$, recomiendan mantener el espaciado entre paredes proporcional a la profundidad de agua de un $0.88h$ y resulta más eficiente si la porosidad va decreciendo progresivamente del frontal al final del cajón. Un conjunto de diez paneles porosos con el

correspondiente valor de porosidad y disposición, sirve como gran absorbedor del oleaje, llegando a valores de $CR < 4\%$ para un rango de oleaje comprendido $1/20 < h/L < 1/2$. Como en los modelos anteriores, el planteamiento teórico se basa en la teoría lineal y se asume que se cumple la ecuación de Laplace para el potencial de flujo.

Kriebel (1992) consideró la interacción del oleaje con una barrera vertical ranurada, presentando un estudio teórico basado en las pérdidas de energía en la pared frontal asociada al estrechamiento y expansión del flujo que pasa por las ranuras. Para ello, aplicó las ecuaciones de continuidad, momento y energía de flujo a través de las ranuras. Como resultado encontró una fórmula para estimar el coeficiente de transmisión que verificó mediante experimentos físicos de oleaje regular.

Kakuno et al. (1992) estudió teóricamente un método denominado de “expansión asintótica acoplado” para evaluar la absorción de energía en un modelo ARJ con pared frontal ranurada. Demostró que existe una pérdida de energía debida al paso del flujo por las ranuras y propuso un nuevo coeficiente para explicar esta pérdida de energía al que denominó “*complex blockage coefficient*”. Los resultados teóricos fueron verificados experimentalmente. El planteamiento teórico de las ecuaciones se basa en teoría lineal y el potencial de velocidad de la lámina de agua satisface la ecuación de Helmholtz.

Fugazza and Natale (1992) analizaron la atenuación del oleaje producida por una estructura permeable y propuso una fórmula para optimizar el diseño hidráulico de los diques tipo Jarlan. El modelo propuesto, basado en la teoría de flujo potencial, fue validado por comparación de los resultados teóricos con las medidas experimentales de Liberatore(1974) y Kondo(1979), para el caso oleaje

regular, y de Sawaragi e Iwata(1979), para el caso de oleaje irregular. Los resultados mostraron que el dique tipo Jarlan con una cámara ofrece la reducción más efectiva en el rango de las aplicaciones prácticas y que no hay una configuración de la pared porosa que pueda ser considerada como la mejor. Concluyen que la geometría del dique no puede ser estándar ya que los parámetros dimensionales que optimizan las propiedades antirreflejantes del mismo están íntimamente relacionados con las características del oleaje. Proponen una serie de fórmulas de diseño para predecir aproximadamente la respuesta de la estructura al oleaje irregular incidente.

Se puede decir que este modelo analítico es representativo del conjunto de modelos teóricos existentes para estimar el CR de estructuras ARJ, por lo que se ha tomado como referencia en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, haciéndose una descripción más detallada de su método de aplicación en el *Capítulo 4 Modelación analítica* y denominándolo, en adelante, como FNO.

Losada et al. (1993) presentan un método analítico para evaluar la eficiencia de una estructura formada por numerosas paredes porosas como estructura atenuadora del oleaje (Fig. 2.49).

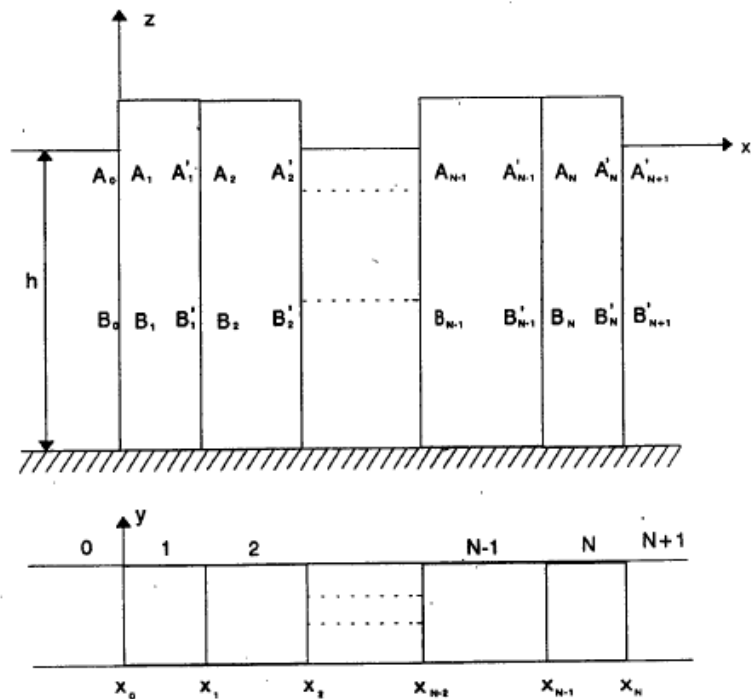


Figura 2.49. Diagrama esquemático de la estructura planteada por Losada et al. (1993)

Para ello, aplican la teoría lineal de ondas que inciden oblicuamente sobre una estructura disipativa. Los resultados teóricos son contrastados con los resultados experimentales de Twu and Lin (1991).

Suh and Park (1995) desarrollaron modelos analíticos para predecir la reflexión del oleaje de un dique vertical perforado cimentado sobre escollera, teniendo en cuenta la direccionalidad del oleaje (Fig. 2.50).

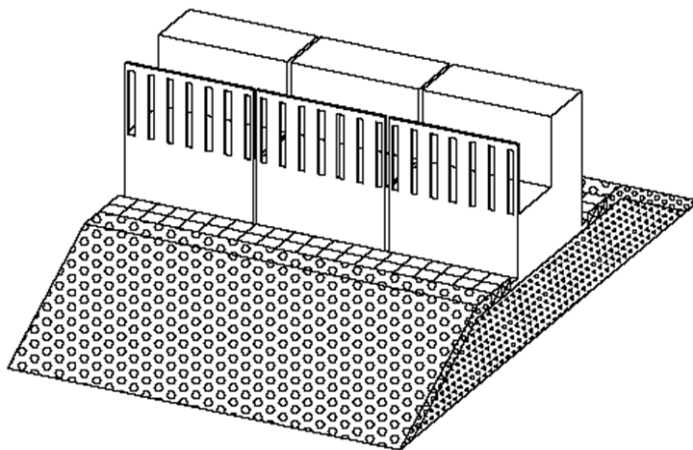


Figura 2.50. Tipología del modelo propuesto por Suh and Park (1995)

Haciendo uso del método de “*Galerkin-eigenfunction*”, y asumiendo las consideraciones del modelo FN0, desarrollaron un modelo para estimar el coeficiente de reflexión para esta tipología, con la consideración de que la banqueta de escollera es impermeable y que la diferencia de profundidad dentro y fuera de la cámara es asumida como un cambio en las características del oleaje por propagación de la onda. La componente de direccionalidad del oleaje se tiene en cuenta incluyendo ésta en el coeficiente de abertura de la pared perforada propuesto por Mei (1983) y modificado en el modelo de FN0.

Isacson et al. (2000) hicieron un análisis teórico similar al propuesto por FN0 y propuso un modelo numérico asociado para evaluar el comportamiento de un cajón tipo ARJ con núcleo de escollera (Fig. 2.51).

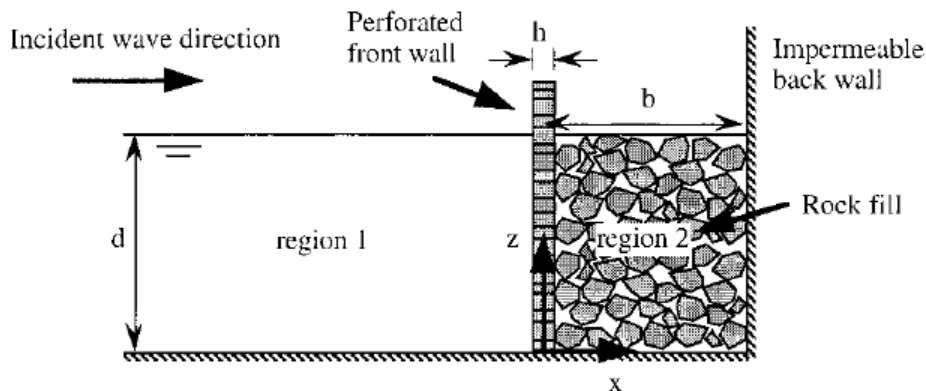


Figura 2.51. Sección del modelo teórico propuesto por Isaacson et al. (2000)

Presentó resultados numéricos relacionados con el coeficiente de reflexión, el remonte y las fuerzas del oleaje, analizando los efectos de la porosidad, geometría del dique y ancho de cámara relativa a la hora de elegir los parámetros adecuados para el modelado de la permeabilidad del dique.

Williams et al. (2000) presentaron soluciones analíticas simplificadas para la estimación del CR en estructuras ARJ de múltiples cámaras, cuyo fundamento teórico es similar al del resto de modelos. La diferencia significativa con respecto al modelo FNO consiste en considerar la disipación de energía dentro de la cámara mediante una función de amortiguamiento. Tras comparar los resultados experimentales de otros autores con los resultados teóricos obtenidos para ARJ de una y de dos cámaras demostraron que la inclusión de factores de amortiguamiento en el interior de la cámara proporciona un mejor ajuste entre resultados teóricos y experimentales. Esta diferencia con respecto al modelo FNO es lo que hecho que se decida tener en cuenta este modelo en el desarrollo de esta Tesis Doctoral.

Zhu and Chwang (2001) estudiaron, tanto analítica como experimentalmente, la interacción entre el oleaje y los diques ranurados parcialmente sumergidos. Se realizaron experimentos físicos para comprobar el buen ajuste con los resultados analíticos. Las características del diseño experimental y sus resultados se han sido descrito en el apartado anterior.

Suh et al. (2001) desarrollaron un modelo analítico basado en otro trabajo anterior (Suh and Park, 1995) para predecir la reflexión del oleaje irregular que incide ortogonalmente sobre un modelo ARJ. Para ello, se utilizaron como parámetros representativos del oleaje irregular la altura de ola significativa, H_s , y la frecuencia de pico, f_p . Los resultados, contrastados con experimentación física, muestran que el CR alcanza su mínimo para un ancho relativo próximo a $B/L=0.2$ y que la reflexión del oleaje irregular depende de la frecuencia del oleaje. No se compara con resultados de oleaje regular equivalente.

Takahashi et al. (2002) usó simulaciones de modelo numérico VOF (*Volume of Fluid*) modelizado para simular el mecanismo de disipación de la energía del oleaje de estructuras marítimas tipo ARJ parcialmente perforadas y comparó con resultados experimentales propios y de Tanimoto and Yoshimoto (1982) y Kakuno et al. (1992) obteniendo ajustes razonables. Este modelo es aplicable para oleaje irregular con ondas muy no lineales y en estructuras cimentadas sobre banqueta de escollera. Como principal inconveniente se apunta el alto coste en tiempo de computación que, por ejemplo, se eleva un orden de magnitud en el caso de oleaje irregular. Sin embargo, el aumento de la capacidad de computación puede hacer competitivos los métodos VOF en un futuro no muy lejano.

Li et al. (2003) presentaron un modelo analítico para estimar el CR en un ARJ parcialmente perforado de dos cámaras que tiene en cuenta la oblicuidad del oleaje (Fig. 2.52). El fundamentado teórico es el mismo que el considerado por el modelo FNO, es decir, teoría lineal de ondas y potencial de velocidad de flujo que satisface ecuación de Laplace.

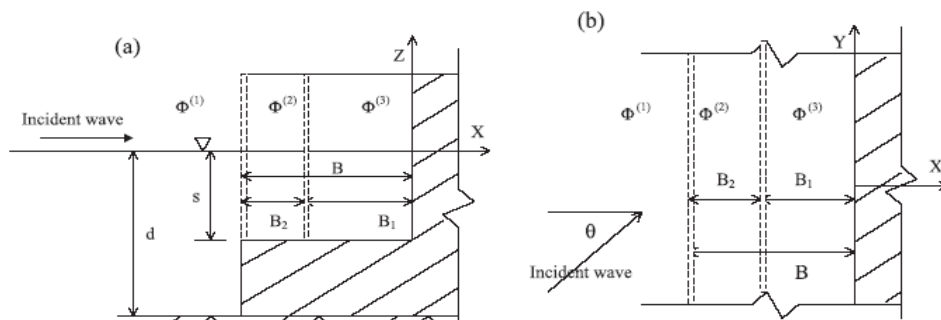


Figura 2.52. Esquema del modelo numérico propuesto por Li et al. (2003): (a) Sección y (b) Planta

Kakuno et al. (2003) utilizaron un método numérico (*Boundary Integral Method*) para estimar el coeficiente de reflexión en una tipología de cajón parcialmente perforado de dos cámaras con ranuras. Analizaron la sensibilidad de diferentes parámetros que intervienen en el fenómeno de reflexión del oleaje sobre la estructura y, como resultado de su trabajo, presentan unas gráficas de diseño para esta tipología.

Gomi et al. (2004) realizaron una simulación numérica en 2D del comportamiento hidráulico de un cajón ARJ cimentado sobre banqueta de escollera y con incidencia oblicua del oleaje regular. El código que sustenta el modelo numérico, que no es presentado, se dice que está basado en el cálculo generalizado de coeficientes de pérdida de flujo en régimen no estacionario. Se validó experimentalmente con algunos ensayos.

Métodos similares han sido presentados por Huang (2006) para estimar el coeficiente de reflexión de modelos ARJ con múltiples cámaras con oleaje irregular de espectro estrecho.

Suh et al. (2006) completaron el modelo analítico desarrollado por Suh and Park (1995) y Suh et al. (2001) a un dique vertical parcialmente perforado. El modelo numérico basado en la teoría lineal tiende a sobreestimar el coeficiente de reflexión del oleaje regular cuando la no linealidad de las ondas aumenta.

Liu et al. (2007) aplicaron a estructuras parcialmente perforadas el modelo analítico de Teng et al. (2004), quienes estudiaron la interacción del oleaje oblicuo sobre una estructura antirreflejanter con diferentes cámaras perforadas de ancho T en dirección longitudinal (Fig. 2.53).

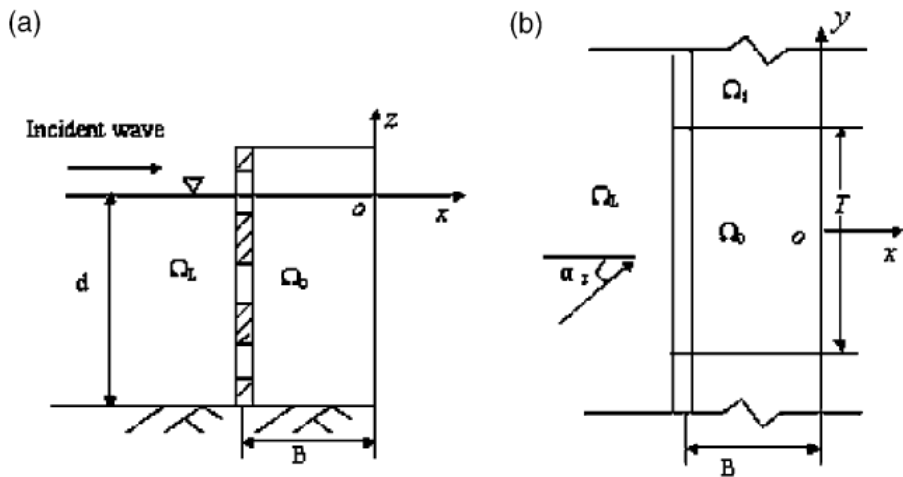


Figura 2.53. Esquema del modelo estudiado por Teng et al. (2004): (a) sección y (b) planta

Como resultado de aplicar el mismo fundamento teórico que el considerado por el modelo FN0, es decir, teoría lineal de ondas y potencial de

velocidad de flujo que satisface ecuación de Laplace, obtienen un modelo de estimación del CR y de las fuerzas del oleaje sobre la estructura.

Chen et al. (2007) aplicaron el método VOF y el modelo K- ϵ , combinado con la ecuación de estado de aire a temperatura constante, para obtener una fórmula simplificada de cálculo de la fuerza horizontal que ejerce el oleaje regular sobre una estructura antirreflejante cubierta superiormente, suponiendo que no existe rebase y que la ola no rompe (Fig. 2.54).

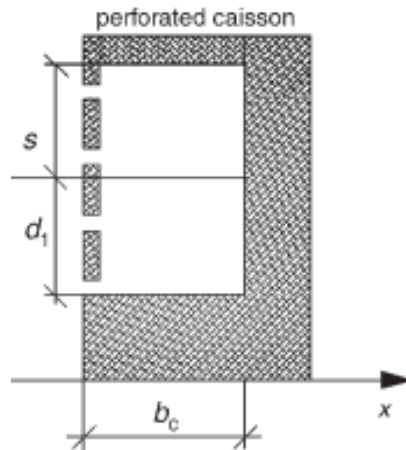


Figura 2.54. Sección del modelo estudiado por Chen et al. (2007)

Liu et al. (2007b) examinaron el fenómeno hidrodinámico que tiene lugar en una estructura ARJ con plataforma horizontal perforada (Fig. 2.55).

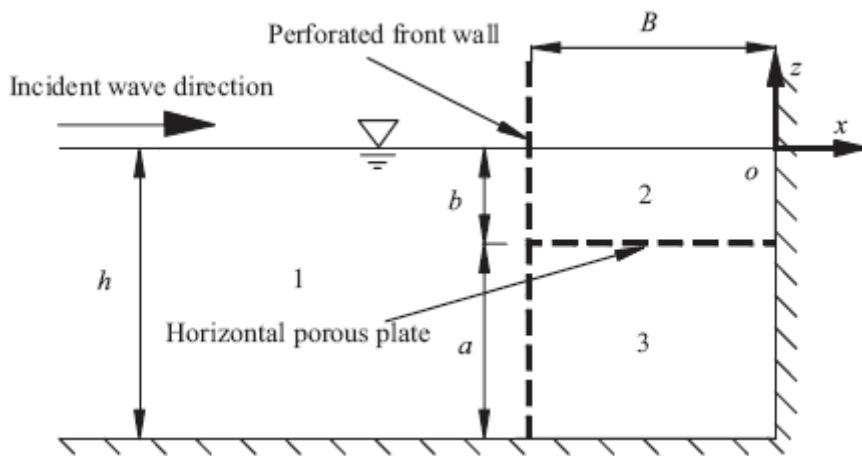


Figura 2.55. Esquema de la sección estudiada por Liu et al. (2007b)

La solución analítica al problema, como en la mayoría de los modelos analíticos expuestos, está basada en la teoría lineal y el potencial de flujo. Como resultado de este estudio se extrajo que la tipología propuesta permite alcanzar $CR < 30\%$ para anchos relativos de cámara inferiores, $B/L = 0.15$, a los que se obtienen con un modelo ARJ clásico.

Liu et al. (2008) aplicó el modelo de Liu et al. (2007) para analizar el fenómeno hidrodinámico y estimar las fuerzas horizontales y verticales en el caso de una estructura ARJ parcialmente perforada con cámaras rellenas de escollera (Fig. 2.56).

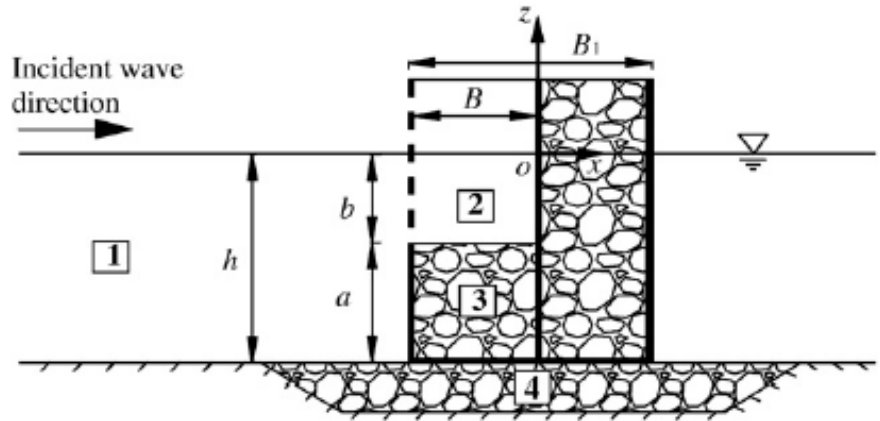


Figura 2.56. Sección tipo del modelo estudiado por Liu et al. (2008)

El resultado muestra la influencia de la porosidad en la efectividad disipante de la estructura. El estudio analítico se completa con experimentos físicos que se utilizan para su validación.

Sankarbabu et al. (2008) estudian el fenómeno hidrodinámico que ocurre en una estructura antirreflejante de cámara perforada cilíndrica propuesta por Tanimoto et al., (1992) y Ojima et al. (1994) para un área recreativa del puerto japonés de Nagashima (Fig. 2.57).

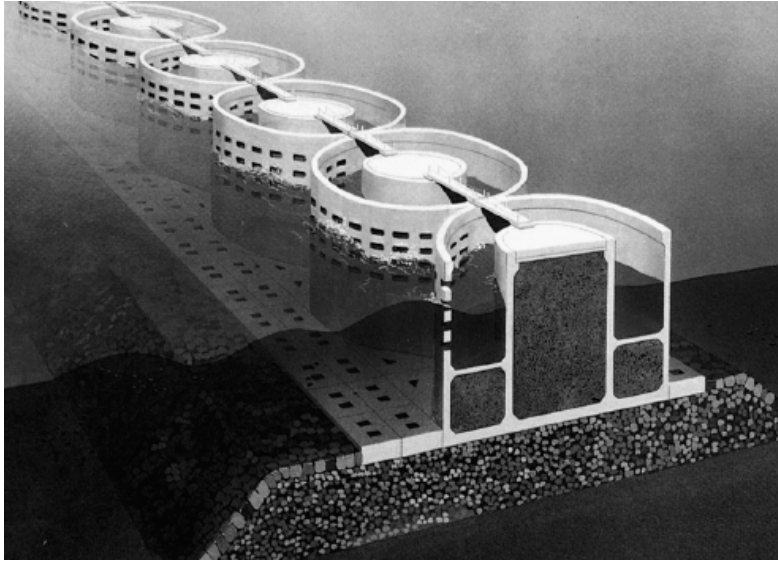


Figura 2.57. Vista esquemática del dique antirreflejante de cámara cilíndrica del puerto de Nagashima (Japón).

Los autores estudian la interacción de ondas lineales sobre un cajón cilíndrico perforado aplicando el método de la “*eigenfunction expansion*”.

Zhu and Zhu (2010) desarrollaron un método analítico para la estimación del CR y las fuerzas en un modelo ARJ. El método denominado de impedancia (“*impedance analytical method*”) parte de principios de transmisión de ondas acústicas, como ya hiciera Jarlan (1965). Como resultado obtienen una expresión algebraica para estimar el CR y las fuerzas sobre la estructura. Estas estimaciones son comparadas con resultados experimentales de otros autores.

2.5. Especificaciones de los principales aspectos de la investigación

A tenor de la revisión de la literatura existente, la presente Tesis Doctoral se centra en el aporte de nuevas formulaciones aplicables de forma sencilla para la estimación del CR y que, estando fundamentadas en los principios teóricos de la teoría del potencial de flujo, tengan en cuenta las componentes no lineales del fenómeno de disipación del oleaje en las estructuras marítimas ARJ. Para ello, las nuevas formulaciones se han de validar con una más amplia base de datos experimental, ya que los ensayos físicos realizados por investigaciones anteriores se han basado, en su mayoría, en tipologías Jarlan de una cámara y con rangos limitados de las variables. Esta carencia se acentúa más en el caso de oleaje irregular.

Un resumen de la información experimental previa existente más representativa de las estructuras marítimas ARJ se muestra en las Tablas 2.1 y 2.2, para oleaje regular, y en las Tablas 2.3 y 2.4, para oleaje irregular. En este resumen, se definen las variables más relevantes y sus rangos de variación.

Oleaje regular	Características del ensayo		
	Número de cámaras	Pared perforada	Número de ensayos
Jarlan (1965)	1	Orificios	≈30
Kondo(1979)	1	Orificios	9
	2		18
Two and Lin (1991)	1	Orificios	30
	2	Orificios	30
Bergmann and Oumeraci (2000)	1	Ranuras horizontales	68
	3		68
Zhu and Chwang (2001)	1	Ranuras	25
PROVERBS (2003)	1	Orificios	≈20

Tabla 2. 1. Rango de las características de ensayos realizados con oleaje regular

Oleaje regular	Número de cámaras	Rango de variables adimensionales					
		B/L	H/L	H/h	p1%	p2%	p3%
Jarlan (1965)	1	1/16-1/4	1/63-1/5	1/4-1	33% y 44%	-	-
Kondo(1979)	1	1/9-1/2	1/57-1/10	1/25	20%	-	-
	2	1/8-1/1.5	1/156-1/29	1/25	20% y 34%	20%	-
Two and Lin (1991)	1	1/18-1/3	1/400-1/28	1/25-2/25	44%	-	-
	2	1/10-1/1.3	1/400-1/28	1/25-2/25	44%	44%	-
Bergmann and Oumeraci (2000)	1	1/17-1/3	1/160-1/15	1/10-1/2	0%-40.5%	-	-
	3	1/5-1/2	1/160-1/15	1/10-1/2	27%	20%	11%
Zhu and Chwang (2001)	1	1/65-1/2	1/52-1/26	1/11	20%	-	-
PROVERBS (2003)	1	1/15-1/3	1/25-1/18	1/25-1/2	28%	-	-

Tabla 2. 2. Rango de variables adimensionales en ensayos realizados con oleaje regular

Oleaje irregular	Características del ensayo		
	Número de cámaras	Pared perforada	Número de ensayos
Sawaragi & Iwata (1979)	1	Orificios	8
Suh et al. (2001)	1	Ranuras	60
Bergmann and Oumeraci (2000)	1	Ranuras horizontales	60
	3		60

Tabla 2. 3. Rango de las características de ensayos realizados con oleaje irregular

Oleaje irregular	Número de cámaras	Rango de variables adimensionales					
		B/L ₀₁	Hs/L01	Hs/h	p1%	p2%	p3%
Sawaragi & Iwata (1979)	1	1/7-1/0.85	1/34-1/34	1/12-1/12	50%	-	-
Suh et al. (2001)	1	1/3-1/25	1/125-1/25	1/14-1/4	33%	-	-
Bergmann and Oumeraci (2000)	1	1/17-1/3	1/160-1/18	1/10-1/3	0%-40.5%	-	-
	3	1/5-1/2	1/160-1/18	1/10-1/3	27%	20%	11%

Tabla 2. 4. Rango de variables adimensionales de ensayos realizados con oleaje irregular

A partir de los ensayos físicos realizados por el autor durante el desarrollo de los proyectos "Estudio de muelles y diques verticales antirreflejantes: MUDIVAR" (2002-2005), "Estudio del rebase y la estabilidad de diques verticales antirreflejantes: REDIVAR" (2007-2009), "Estudio de muelles de cajones antirreflejantes: MUCAR" (2008-2010) y "Diseño y adaptabilidad de Cajoneros convencionales para la construcción de Diques y Muelles Antirreflejantes: CADIMA" (2008-2011), en la que se consideran diferentes tipologías ARJ con diferentes porosidades de cámara y características de oleaje regular e irregular, se aumenta la base experimental de manera significativa con respecto a los ensayos físicos más relevantes existentes hasta la fecha (Tabla 2.5).

	Características del ensayo			Rango de variables adimensionales [regulares (irregulares)]				
	Número de cámaras	Pared perforada	Número de ensayos	B/L (B/L ₀₁)	H/L (Hs/L ₀₁)	H/h (Hs/h)	p1%	p2%
Oleaje regular	1	Orificios	358	1/20-1/2	1/150-1/10	1/15-1/3	13%-35%	-
	1	Ranuras	605				20%-50%	-
	2	Orificios	212	1/10-1	3/1000-1/10	1/250-1/2	13%-35%	5%-26%
	2	Ranuras	382				30%-40%	20%-30%
Oleaje irregular	1	Orificios	60	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-
	1	Ranuras	58	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-
	2	Orificios	21	1/7-2/3	1/100-3/50	1/8-1/3	13%-35%	5%-26%
	2	Ranuras	32				30%-40%	20%-30%

Tabla 2. 5. Características de ensayos realizados

En concreto, se ha ampliado el número de ensayos de las diferentes tipologías (cajones de 1 y 2 cámaras, y paredes perforadas de orificios y ranuras), se ha completado y ampliado el número de ensayos con oleaje irregular de las diferentes tipologías ensayadas y se ha ampliado el rango de las variables adimensionales, a priori más influyentes en el fenómeno hidrodinámico de la reflexión del oleaje en estructuras marítimas ARJ, al objeto de obtener un modelo representativo en un mayor rango de las variables. Como se describe en el siguiente capítulo (Capítulo 3 Modelación física), a escala de modelo, los ensayos de oleaje monocromático tienen un rango de altura de ola de $4 < H(\text{cm}) < 16$ y periodos en el rango de $0.6 < T(\text{s}) < 3.5$. Los ensayos con oleaje irregular son para alturas de ola significativa en el rango de $4 < H_s(\text{cm}) < 15$ y periodo de pico en el rango de $1 < T_p(\text{s}) < 2.5$. Se ensayan dos profundidades de agua $h(\text{cm}) = 32$ y 40 , tanto ensayos con oleaje regular como en ensayos con oleaje irregular.

CAPÍTULO 3

Modelación física

Capítulo 3

Modelación física

3.1. Introducción

La importancia de los modelos físicos en el estudio de los fenómenos del oleaje sobre estructuras marítimas es fundamental para la interpretación de los resultados y para establecer y validar los correspondientes modelos teóricos o numéricos que se derivan de esta interpretación.

En esta Tesis Doctoral se ha planteado la necesidad de realizar un amplio estudio experimental sobre modelos físicos de tipologías antirreflejantes tipo Jarlan (ARJ) que asegure el contraste con otros estudios experimentales anteriores y que complete esta base de datos para abarcar una casuística suficientemente amplia que permita el desarrollo posterior de modelos teóricos y numéricos.

En este capítulo, se describen las características del modelo físico ensayado a escala en el canal de oleaje de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), la metodología empleada en la realización de los análisis y los resultados experimentales obtenidos de la experimentación con diferentes tipologías ARJ que servirán de base para el posterior estudio analítico y numérico del fenómeno de la reflexión.

3.2. *Diseño experimental*

Los ensayos en modelo físico se realizaron en el canal de ensayos de oleaje del LPC-UPV con sistema de generación de oleaje accionado por un pistón de traslación con equipo hidráulico y sin sistema de absorción de reflexiones. El canal tiene de dimensiones(m) 30x1.2x1.2, con un falso fondo que se eleva 0.25 m para evitar el “pilling up” y la rotura en pala de los canales de fondo constante (Fig. 3.1).

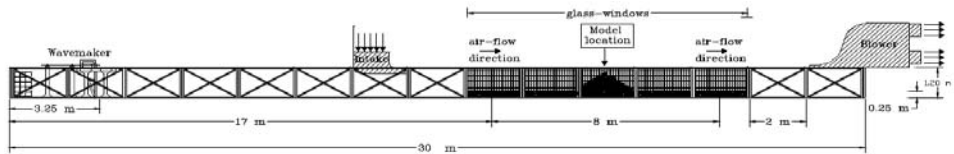


Figura 3. 1. *Sección longitudinal del canal de ensayos del LPC-UPV.*

Los modelos físicos ensayados son estructuras a escala del tipo Jarlan con abertura de orificios (Fig. 3.2 y 3.3) y aberturas de ranuras (Fig. 3.4) en sus paredes.



Figura 3. 2. *Modelo ARJ de una cámara con abertura de orificios*

En este caso, los modelos ARJ están formados por cámaras interiores con aberturas hasta la base, de manera que la profundidad de agua es la misma dentro y fuera de las cámaras.

Las diferentes tipologías ensayadas han sido cajones de una, dos y tres cámaras, con tres anchos de cámara [$20 < B(\text{cm}) < 60$] y diferentes porosidades en las paredes perforadas ($p\% = 100 \times A_p / A_t$). En el caso de paredes perforadas de orificios, las porosidades varían entre $5\% < p\% < 35\%$ y en el caso de paredes perforadas de ranuras varían entre $10\% < p\% < 50\%$. Las siguientes figuras muestran las diferentes tipologías ensayadas (Fig. 3.3 y 3.4).

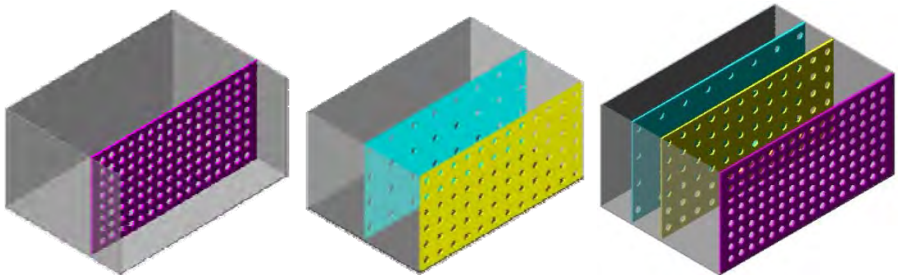


Figura 3. 3. ARJ con aberturas de orificios

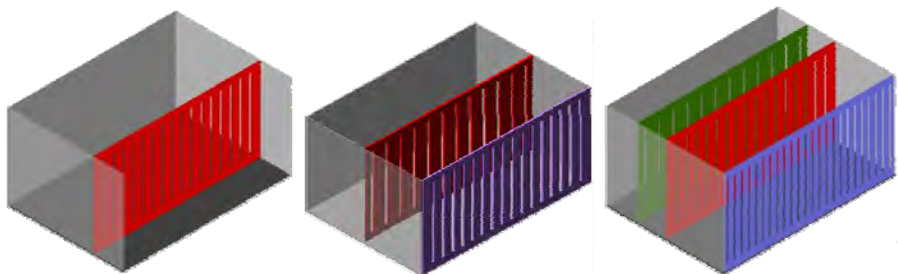


Figura 3. 4. ARJ con aberturas de ranuras

Se realizan 1200 ensayos con oleaje regular y 80 ensayos con oleaje irregular sobre modelos con abertura de ranuras y 600 ensayos con oleaje regular

y 80 ensayos con oleaje irregular, sobre modelos con aberturas de orificios. A escala de modelo, los ensayos de oleaje monocromático se hicieron para un rango de altura de ola de $4 < H(\text{cm}) < 16$ y periodos en el rango de $0.6 < T(\text{s}) < 3.5$. Los ensayos con oleaje irregular se realizaron para alturas de ola significativa en el rango de $4 < H_s(\text{cm}) < 15$ y periodo de pico en el rango de $1 < T_p(\text{s}) < 2.5$.

En los ensayos irregulares se generaron trenes de 1000 olas de duración con un espectro JONSWAP de parámetro $\gamma=3.3$, y frecuencias mínima y máxima de $f_{\min}=0.5f_p$ y $f_{\max}=2.5f_p$, respectivamente, siendo f_p la frecuencia de pico del espectro.

El oleaje irregular se simula a partir del espectro JONSWAP:

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma \exp \left[\frac{-\left(\frac{\omega}{\omega_p} - 1 \right)^2}{2\sigma^2} \right]$$

donde:

$$\alpha = 0.0081; \gamma = 1 \text{ a } 10; \sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{si } \omega < \omega_p \\ 0.09 & \text{si } \omega > \omega_p \end{cases} \text{ y } \omega_p = \frac{1}{T_p} = \text{frecuencia de pico.}$$

En los ensayos regulares se generaron trenes de 50 olas con periodo y altura de ola constante en las 40 ondas centrales y 5 olas de transición al inicio y finalización del tren de olas generado, que se incluyen como transición.

Los registros de oleaje han sido obtenidos mediante la medición con 5 sensores de nivel colocados frente al modelo a una distancia adecuada para poder realizar un análisis correcto de los resultados, según el método utilizado.

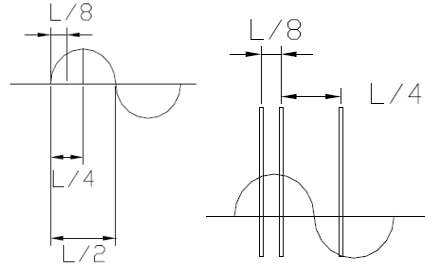


Figura 3. 5. Esquema de la onda de oleaje y sensores necesarios para su definición

Como se observa en la Figura 3.5., es recomendable que cada onda quede definida entre un mínimo de tres sensores, lo que permite que se pueda estimar la forma de la onda en seno y cresta en cada instante de tiempo. Para lograrlo, una buena separación entre sensores está relacionada con el octavo y la cuarta parte de la longitud de onda L , $L = L(T, h)$.

En la Figura 3.6 se muestra un croquis con la posición de los sensores, donde $D1$ y $D2$ varían según la longitud de onda de cada ensayo entre 1,5 m. y 0,5 m.

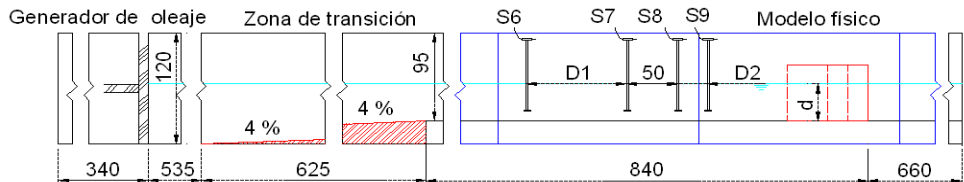


Figura 3. 6. Disposición de los sensores de medida.

Para la realización y análisis de los ensayos se ha aplicado la metodología y herramientas propias de la experimentación con modelo físico.

3.3. *Análisis de resultados*

A partir de los registros obtenidos de los sensores en el canal de ensayos, el análisis de datos tiene como objetivo obtener los parámetros que caracterizan al oleaje generado, así como el oleaje incidente y reflejado que llega al modelo.

En este análisis de resultados, la separación del oleaje incidente del reflejado es la clave para obtener una estimación precisa del coeficiente de reflexión, y por tanto, una modelización fiable del fenómeno de reflexión objeto de esta Tesis Doctoral.

3.3.1. *Separación de oleaje incidente y reflejado*

La utilización de un método adecuado para la estimación del oleaje incidente y reflejado que tenga en cuenta el carácter no lineal del oleaje es una cuestión central de esta Tesis Doctoral, ya que de ello depende la correcta determinación del coeficiente de reflexión del oleaje a partir de los valores de oleaje total medidos experimentalmente y, por tanto, el buen ajuste del modelo semiempírico que se desarrolla. Sin embargo, la estimación de la reflexión como parte de la respuesta de la estructura a la acción del oleaje es un problema de difícil resolución que se presenta en los experimentos de laboratorio y de campo.

El primer método propuesto para separar oleaje Incidente y reflejado (I+R), mundialmente utilizado y fundamento de la familia de métodos de separación más numerosa, es el “2-point”, popularizado por Goda y Suzuki (1976). Este método supone unas hipótesis que solo se cumplen en simulaciones numéricas de oleaje (ver Medina 2001): (1) relación de dispersión lineal, (2) oleaje estacionario y lineal, (3) superposición de ondas, (4) ondas periódicas y (5) señal sin ruido. El “2-point” es un método definido para oleaje regular monocromático

que se aplica al oleaje irregular trabajando en el dominio de la frecuencia; se calcula el espectro de frecuencias del registro original, obtenido a partir de la transformada discreta de Fourier y se opera con las componentes como si fueran independientes. Otra característica de este método es que la estimación global de oleaje I+R viola el principio de causalidad, ya que valores pasados del análisis dependen de valores futuros.

A partir del método “2-point” se han desarrollado otros métodos con más puntos de medida de datos, como son el “3-point” de Mansard y Funke (1980) y el método para n-puntos de Zelt y Skjelbreia (1993) o el Baquerizo (1997). Otro método basado en el “2-point” es el método de Kimura (1985), que emplea la aproximación local por ventanas temporales gaussianas, permitiendo el análisis de oleaje no estacionario. La optimización local en cada ventana se realiza mediante el método “2-point” suponiendo que el oleaje es lineal.

El método LASA, acrónimo de su significado en inglés “*Local Analisis using Simulated Annealing*” (Análisis Local usando Cristalización Simulada), fue desarrollado por Medina (2001) y mejorado por Figueres et al. (2003) para onda muy no-lineales. Es un método de separación de oleaje I+R por aproximación local a un modelo de onda. En este método, el registro se discretiza en ventanas temporales cuyas soluciones finalmente se superponen mediante una ley triangular. Se permite así analizar oleaje no estacionario y no lineal, ya que el modelo de onda local es de tipo Stokes-II o superior. La optimización local en cada ventana temporal se realiza mediante cristalización simulada. El LASA es un método de análisis en el dominio del tiempo, evitando los inconvenientes del análisis espectral, del análisis global y de la suposición de linealidad del oleaje, que ha sido contrastado con el “2-point” de Goda y Suzuki (1976) y el de Kimura

(1985) resultando ser un método más robusto en los experimentos numéricos y el más consistente en los experimentos físicos, tanto con oleaje regular como con irregular. El método LASA puede aplicarse directamente al análisis de oleaje regular e irregular 2D con cualquier número de sensores de nivel y ola a ola, por su carácter temporal.

El software que contiene el código del método LASA se ha implementado en el LPC-UPV (Fig. 3.7), dando buenos resultados en el análisis de oleaje incidente y reflejado aplicado a grupos de olas (Garrido et al., 2002) o estudiando la correlación entre oleaje incidente y presiones en el espaldón de un dique en talud (Garrido et al., 2003). La comparación del LASA con el método de análisis de oleaje incidente y reflejado mediante filtros digitales de Frigaard y Brorsen (1995), y con el método de Baquerizo (1997), basado en el de Mansard y Funke (1981), ha demostrado la robustez del LASA en el análisis de oleajes con apuntamientos importantes (no lineales). Por todo ello, es también el método utilizado para la estimación del CR de los ensayos físicos llevados a cabo en esta Tesis Doctoral.



Figura 3. 7. Vista de la interfase del software de método de separación de oleaje I+R LISA

3.3.2. Parametrización del oleaje

Los parámetros que caracterizan el oleaje han sido obtenidos mediante el análisis en el dominio frecuencial y temporal de los trenes de onda. Los parámetros elegidos para la caracterización del oleaje han sido, para el oleaje regular la altura de ola, H , y la longitud de onda, L , correspondiente al periodo de la ola, T , en el dominio del tiempo; y para el oleaje irregular, la altura de ola significante, $H_s=H_{m,0}$, el periodo de pico $T_p=T_{01}$ y la longitud de onda correspondiente a este periodo de pico, $L_{0,1}$, en el dominio de la frecuencia. En el análisis en dominio temporal, la altura de ola se define por los sucesivos pasos descendentes por cero y el coeficiente de reflexión (CR) es la relación entre la $H_{m,r}$ y $H_{m,i}$, donde $H_{m,r}$ y $H_{m,i}$ son la altura de ola media del conjunto de olas que forman el tren de oleaje reflejado e incidente, respectivamente.

En el dominio de la frecuencia, el análisis se realiza mediante la Transformada de Fourier Directa de la onda generada por la elevación de la superficie del agua, siendo la $H_{m0}=4 \cdot (m_{01})^{1/2}$ y $T_{01}=m_0/m_1$, donde m_i se define como el momento espectral de orden i . El CR para oleaje irregular es la relación entre $H_{m0,r}$ y $H_{m0,i}$, donde $H_{m0,r}$ y $H_{m0,i}$ son la altura de ola significativa del tren de oleaje reflejado e incidente, respectivamente. En ambos casos, la longitud de onda y el periodo se relacionan entre sí y con la profundidad de agua en las proximidades del modelo mediante la ecuación de dispersión lineal.

En las tablas, incluidas como Anexo D, se muestran los valores obtenidos para los diferentes parámetros de oleaje analizados, así como el valor del coeficiente de reflexión, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, separando los resultados según tipologías de modelo ensayado.

A continuación, se presentan los resultados del análisis de datos, tanto para oleaje regular como para oleaje irregular. Se ha tomado para la representación el valor de CR estimado respecto del ancho relativo de la cámara, que es B/L para modelo ARJ de una cámara y $(B1+B2)/L$ para modelo ARJ de dos cámaras.

3.4. Resultados experimentales

3.4.1. Modelo ARJ de una cámara

Las siguientes figuras muestran el resultado obtenido para el caso de modelos ARJ de una cámara con aberturas de orificios (Fig. 3.8) y ranuras (Fig. 3.9).

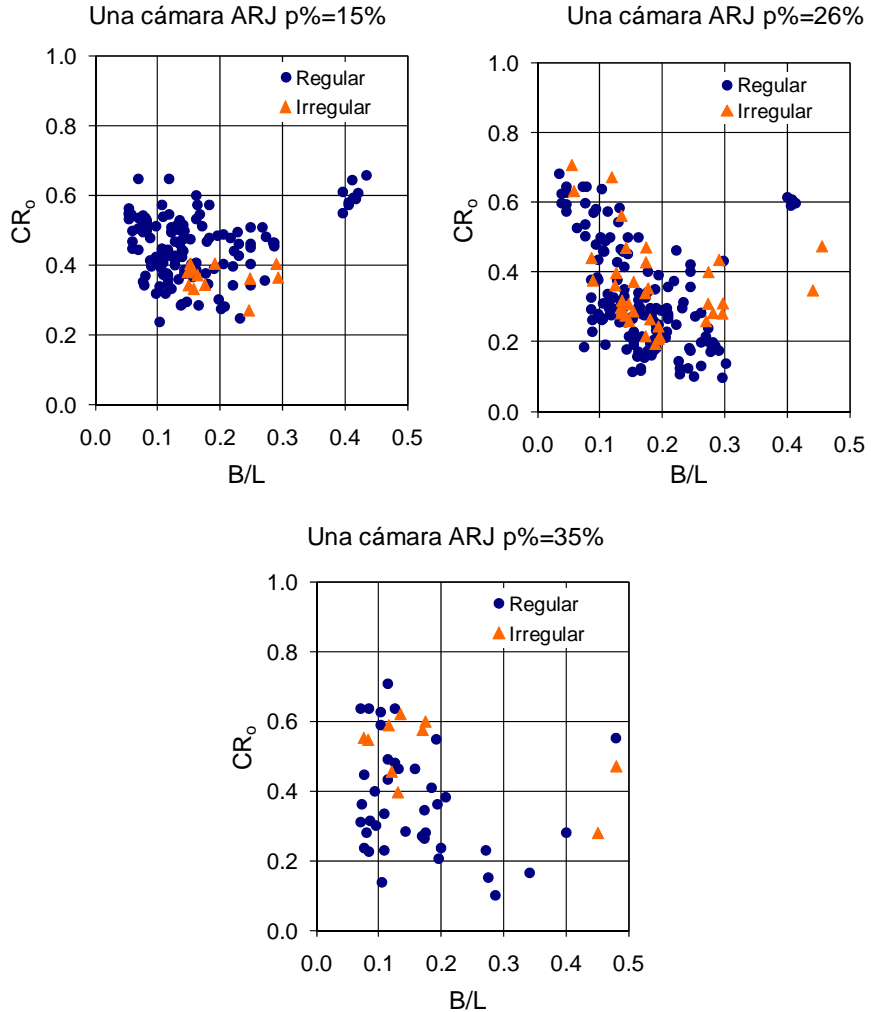


Figura 3. 8. CR_o (observado) en ARJ de una cámara y abertura de orificios

Se observa que existe influencia de la porosidad en el valor observado de CR , siendo óptima la disipación de la cámara para porosidades intermedias ($p\%\approx 30\%$) en el caso de abertura a base de orificios.

En cuanto a los modelos ensayados con abertura en forma de ranura, las estimaciones del CR menores también parece que corresponden a porosidades $p\% \approx 30\%$.

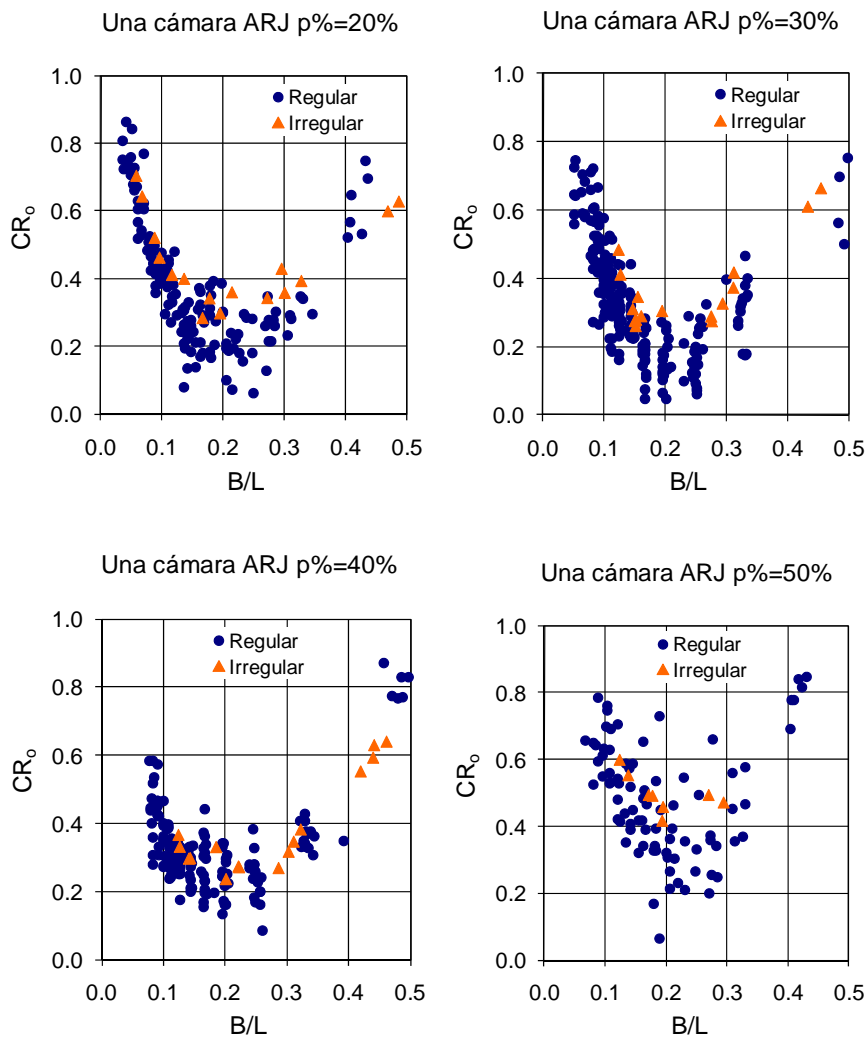


Figura 3.9. CR_o (observado) en ARJ de una cámara y abertura de ranuras

En general, se ha comprobado que los valores del CR en ranuras son similares que los obtenidos en orificios, aunque en el caso de abertura tipo orificio, el valor estimado de CR tiene mayor dispersión.

En lo que se refiere a la diferencia entre los ensayos de oleaje regular e irregular, para ambos casos la tendencia es similar en cuanto a la curva que relaciona el ancho relativo, B/L , con CR, aunque el valor estimado para el CR en el caso de oleaje irregular parece ser ligeramente inferior al del oleaje regular equivalente ($H=H_{m0}$ y $T=T_{01}$).

3.4.2. Modelo ARJ de dos cámaras

Las figuras 3.10 y 3.11 muestran que en los ensayos realizados con modelo ARJ de dos cámaras perforadas, el CR es inferior para la combinación de porosidades más alta, siendo en todos los casos inferior al 60%, en un amplio rango de ancho relativo de cámara.

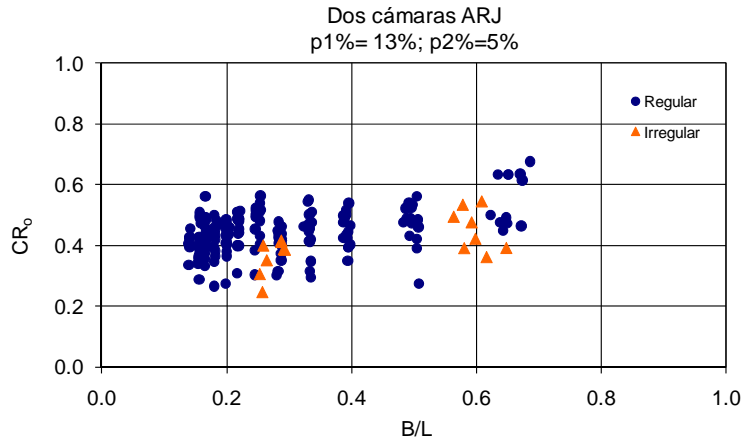


Figura 3. 10. CR_o (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de orificio ($p1\% = 13\%$ y $p2\% = 5\%$)

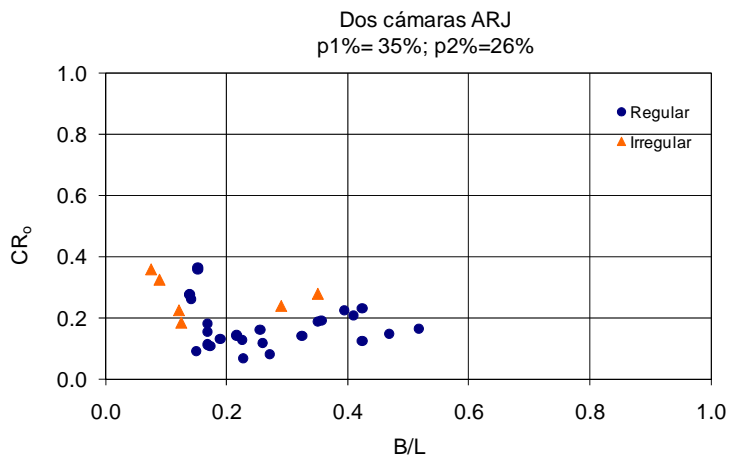


Figura 3. 11. CR_o (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de orificio ($p1\% = 35\%$ y $p2\% = 26\%$)

Por otro lado, el coeficiente de reflexión que se obtiene en aberturas de orificios (Fig. 3.10 y Fig. 3.11) es similar al obtenido para ranuras (Fig. 3.12 y Fig. 3.13).

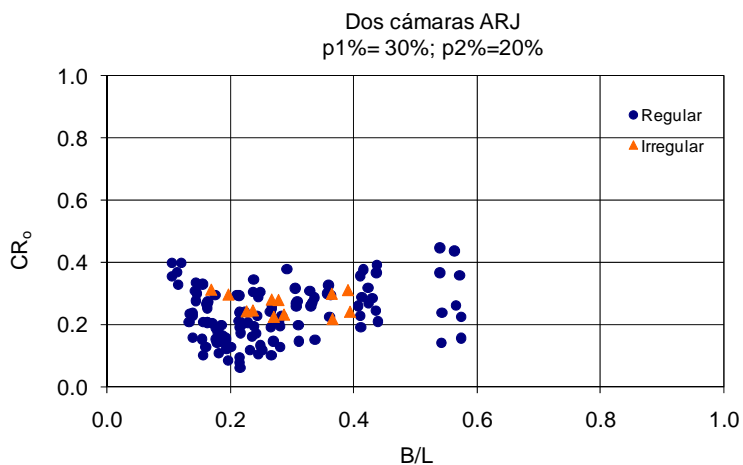


Figura 3. 12. CR_o (observado) en ARJ de dos cámaras y abertura de ranura ($p1\% = 30\%$ y $p2\% = 20\%$)

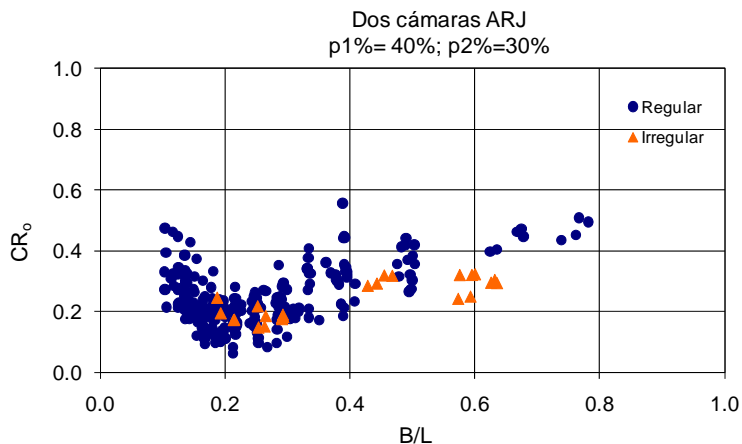


Figura 3. 13. CR_o (observado) en ARJ de dos cámaras y apertura de ranura (p1%=40% y p2%=30%)

3.4.3. Modelo ARJ de tres cámaras

Se han realizado ensayos con una sola disposición de paredes perforadas dentro del modelo ARJ de tres cámaras, tanto para apertura de orificios (Fig. 3.14) como para apertura de ranuras (Fig. 3.15).

En ambos casos, orificios y ranuras, no parece que la inclusión de una tercera cámara perforada mejore el resultado del CR estimado, por lo que teniendo en cuenta esto y que las variantes ensayadas de esta tipología son limitadas, la tipología de tres cámaras no se incluye en el estudio posterior.

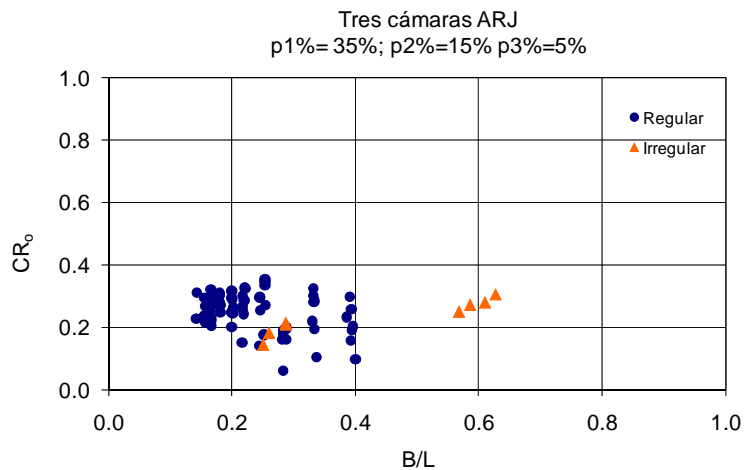


Figura 3. 14. CR_o (observado) en triple-cámara ARJ y abertura de orificio ($p1\% = 35\%$, $p2\% = 15\%$ y $p3\% = 5\%$)

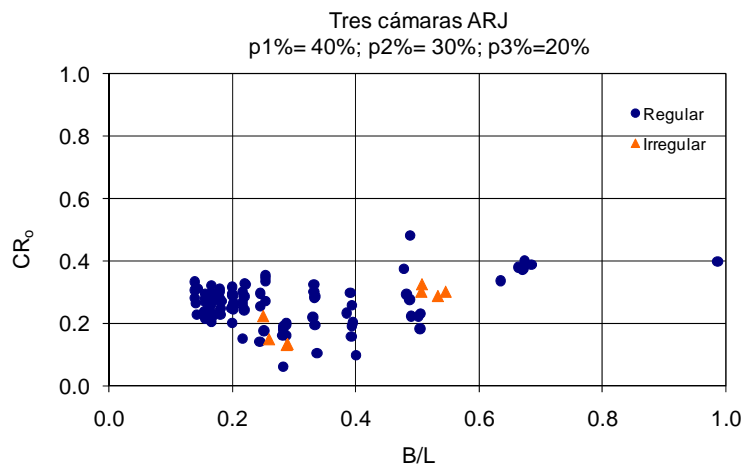


Figura 3. 15. CR_o (observado) en triple-cámara ARJ y abertura de ranura ($p1\% = 40\%$, $p2\% = 30\%$ y $p3\% = 20\%$)

En el Anexo D.1 se incluye los resultados obtenidos de los ensayos regulares y el Anexo D.2 incluye los resultados obtenidos de los ensayos irregulares.

3.5. *Conclusión de los resultados experimentales*

Al objeto de ampliar la base de datos existente, se han llevado a cabo un amplia batería de ensayos, tanto regulares (Tabla 3.1), como irregulares (Tabla 3.2).

Características del ensayo			Rango de variables adimensionales				
Número de cámaras	Pared perforada	Número de ensayos	B/L	H/L	H/h	p1%	p2%
1	Orificios	358	1/20-1/2	1/150-1/10	1/15-1/3	13%-35%	-
1	Ranuras	605				20%-50%	-
2	Orificios	212	1/10-1	3/1000-1/10	1/250-1/2	13%-35%	5%-26%
2	Ranuras	382				30%-40%	20%-30%

Tabla 3. 1. Características y rangos de variables en ensayos regulares

Características del ensayo			Rango de variables adimensionales				
Número de cámaras	Pared perforada	Número de ensayos	B/L ₀₁	Hs/L01	Hs/h	p1%	p2%
1	Orificios	60	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-
1	Ranuras	58	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-
2	Orificios	21	1/7-2/3	1/100-3/50	1/8-1/3	13%-35%	5%-26%
2	Ranuras	32				30%-40%	20%-30%

Tabla 3. 2. Características y rangos de variables en ensayos irregulares

Los resultados obtenidos de estos ensayos muestran, en consonancia con otros autores referidos en anteriores capítulos de esta Tesis Doctoral, que en estructuras marítimas ARJ, el valor de CR se reduce en función del ancho relativo

de la cámara (B/L), pero esta variable no explica por sí sola los resultados obtenidos de CR.

Otras variables dependientes de la estructura que se han tenido en cuenta en los experimentos y que, además de la variable B/L , pueden influir en el CR obtenido son el tipo de abertura de las paredes, la porosidad y el número de cámaras. En cuanto a las variables climáticas, además de la longitud de onda, otras variables como la altura de ola han de ser consideradas para explicar el fenómeno de la reflexión en estructuras marítimas ARJ.

En todos los casos se observa que la porosidad tiene una importante influencia sobre el resultado del CR; sin embargo, con la sola observación de los resultados experimentales es difícil detectar de qué manera influye, junto con el resto de variables que intervienen en el fenómeno, y qué otros factores pueden explicar la dispersión de las estimaciones de CR dependientes del ancho de cámara relativo, B/L .

En el *Capítulo 4 Modelo analítico*, se presentan los resultados obtenidos por diferentes modelos analíticos en la estimación del CR para una y dos cámaras, prescindiendo de los resultados experimentales obtenidos para tres cámaras dada la poca variabilidad de los parámetros estructurales existente (porosidad y anchos de cámara). Se analiza la bondad del ajuste en relación a los experimentos físicos realizados y se trata de mejorar la estimación del modelo analítico en relación a la influencia que cada variable puede tener en el resultado.

CAPÍTULO 4

Modelación analítica

Capítulo 4

Modelación analítica

4.1. Introducción

La amplia base de datos obtenida del modelo experimental permite obtener un mejor ajuste de los resultados de los modelos analíticos que estiman el porcentaje de energía reflejada para tipologías similares a las ensayadas y para mayores rangos de los parámetros que determinan el diseño, B/L, H/L y p%. Para ello, en este capítulo, se describen y justifican los modelos analíticos elegidos, se validan con respecto a los resultados de los ensayos y, por último, se presenta un nuevo ajuste en función de la porosidad de la pared perforada del modelo analítico para estimar la energía reflejada (RE) en estructuras marítimas ARJ.

4.2. Justificación de los modelos analíticos seleccionados

La mayoría de los modelos analíticos existentes para la estimación del CR en estructuras marítimas ARJ están basados en teoría lineal. Los potenciales de velocidad de la onda reflejada y transmitida son determinados a partir de la ecuación de potencial de flujo, considerando que el fluido es incompresible, no-viscoso e irrotacional. Para ello, se definen las condiciones de contorno adecuadas para cada región de la estructura y las características de la misma.

Los fenómenos fundamentales que gobiernan la interacción entre oleaje y estructura en estructuras de baja reflectividad son fundamentalmente tres: (1) Los efectos inerciales, debidos al desfase entre la velocidad y la presión a un lado y otro de la pared perforada, (2) la resistencia al obstáculo y (3) el amortiguamiento de la onda en el interior de la cámara.

El considerado más representativo de todos los modelos descritos en el *Capítulo 2 Estado del conocimiento* es el modelo de Fugazza and Natale (1992), denominado en esta Tesis Doctoral como modelo FN0. Este modelo tiene en cuenta los efectos inerciales, representados por la función de disipación lineal (β) y la resistencia, dependiente de la geometría de la pared perforada y su porosidad ($p\%$) y las características del material.

Además del modelo FN0, el modelo de Williams et al (2000), denominado en esta Tesis Doctoral como modelo W0, también se basa en la teoría de potencial de flujo pero con la diferencia de que incluye el concepto de disipación de energía en el interior de la cámara, que se considera como un fenómeno de amortiguamiento de la onda que tiende a reducir la amplitud de ésta por pérdida

de energía en el propio proceso oscilatorio dentro de la cámara, que es modelado empíricamente por la función de amortiguamiento (D).

4.2.1. Modelo FN0

El modelo FN0 propuesto por Fugazza and Natale (1992) presenta una solución analítica para el cálculo de la reflexión de estructuras marítimas ARJ de múltiples cámaras, asumiendo las hipótesis de oleaje monocromático, cresta larga, pequeña amplitud de onda, oleaje de incidencia normal y profundidad de agua igual dentro y fuera de la cámara. Hasta la aparición de este trabajo, no existían fórmulas de cálculo de la reflexión en ARJ, siendo éste un punto de partida en la obtención de fórmulas para el diseño preliminar de los ARJ.

Como ya se ha referido anteriormente, en el modelo FN0 se tienen en cuenta tanto los efectos inerciales como de resistencia al obstáculo. De estos dos fenómenos considerados, el de los efectos inerciales es el que ha sido especialmente estudiado en esta Tesis Doctoral al objeto de intentar mejorar el ajuste empírico original del modelo FN0. Los efectos inerciales son considerados en la función β (ver expresión [A.6] del Anexo A) que depende del coeficiente de abertura de pared (α), el cual a su vez depende del coeficiente de descarga (C_c), que fue obtenido de forma empírica, y de la geometría de la pared perforada, en forma de porosidad (p), como se muestra en la expresión [4.1]:

$$\alpha = \left(\frac{1}{pC_c} \right)^2 - 1 \quad [4.1]$$

El modelo FN0 para oleaje regular fue originalmente calibrado con los resultados experimentales obtenidos por Liberatore (1974) and Kondo (1979) para porosidades de $p=20\%$, 33% y 50% en ARJ de una cámara y $p_1=33\%$ -

$p_2=20\%$, $p_1=33\%-p_2=65\%$ y $p_1=20\%-p_2=20\%$ en ARJ de dos cámaras para los casos de oleaje regular. Para oleaje irregular, el modelo fue calibrado con los experimentos realizados por Sawaragi and Iwata (1979). Como resultado de la calibración, el modelo FN0 toma $C_c = 0.55$ en la expresión [4.1]. En cuanto a los límites de validez de los parámetros B/L y h/L , este modelo analítico se propone como válido para $0,03 \leq h/L \leq 0,3$ y para $0,03 \leq B/L \leq 0,25$, siendo $k_0 = 2\pi / L$ el número de onda que satisface la función de dispersión $\omega^2 = gk_0 \tanh k_0 h$, L es la longitud de onda, h la profundidad de agua, B es el ancho de la cámara perforada y g es la aceleración de la gravedad.

El procedimiento de cálculo seguido para la estimación del CR con este modelo es descrita en el Anexo A.

4.2.2. Modelo W0

El modelo W0 propuesto por Williams et al. (2000) está basado en la teoría de potencial de flujo y asume que los fenómenos físicos básicos que rigen la interacción estructura-oleaje son la reflexión y la transmisión a través de la pared ranurada o perforada y la disipación de energía en el interior de la cámara. Se desarrollan dos modelos analíticos diferentes para ARJ de una cámara y para ARJ de dos cámaras, no con la pretensión de solucionar de manera exacta el problema, sino que tratan de ser un indicador de la eficiencia de la estructura como disipadora del oleaje reflejado. La principal diferencia que aporta el modelo de W0 al modelo FN0, como ya se ha comentado anteriormente, es el de considerar la disipación de energía en el interior de la cámara, modelada empíricamente mediante la función de amortiguamiento (D), cuya expresión es [4.2]:

$$D(L, B) = k_0^2 \gamma \left(\frac{B}{L} \right) \quad [4.2]$$

donde γ es el coeficiente de amortiguamiento, $k_0 = 2\pi / L$ es el número de onda que satisface la función de dispersión $\omega^2 = gk_0 \tanh k_0 h$, L es la longitud de onda y B es el ancho de la cámara perforada.

El modelo W0 fue calibrado con los resultados experimentales de Kondo (1979) y Two and Lin (1991) para porosidades de $p\%=34\%$ y $p\%=42\%$ en ARJ de una cámara y $p1\%=38\%$ - $p2\%=20\%$ para ARJ de dos cámaras. Al igual que en caso del modelo FNO, el valor del coeficiente empírico de descarga toma el valor $Cc=0.55$. Los rangos de validez del modelo en cuanto a los parámetros B/L y h/L , se asemejan a los del modelo FNO.

El procedimiento de cálculo seguido para la estimación del CR con este modelo es descrita en el Anexo B.

4.3. Validación de los modelos FNO y W0

4.3.1. Introducción

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, de entre todos los modelos analíticos existentes, se han seleccionado para la comparación con los resultados experimentales, el modelo FNO y el modelo W0.

La estimación del CR obtenida por ambos modelos se compara con los resultados experimentales observados en la experimentación física para una cámara (Fig. 4.1.a) y ARJ de dos cámaras (Fig. 4.1.b), diferentes porosidades y oleaje regular e irregular.

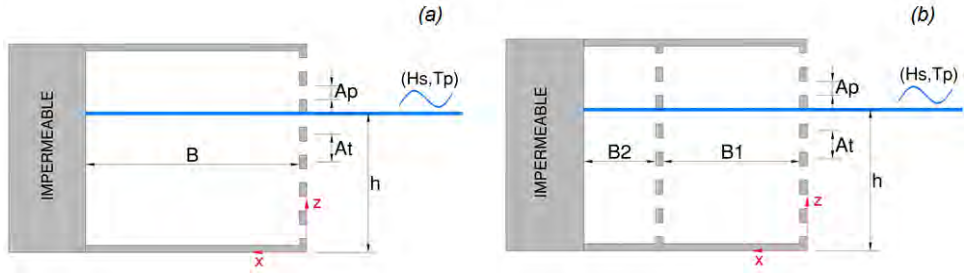


Figura 4. 1. Esquema de ARJ de: (a) una cámara y (b) dos cámaras.

Para medir la bondad del ajuste se ha utilizado el error medio cuadrático relativo, rMSE, cuya expresión es la siguiente [4.3]:

$$rMSE = \frac{\sum_{i=1}^N (RE_e^2 - RE_o^2)_i}{\sum_{i=1}^N (RE_o^2)_i} \quad [4.3]$$

Donde $RE_i = (CR^2)_i$ es el porcentaje de energía reflejada del ensayo i . A continuación, se muestra la comparación entre los resultados experimentales y los resultados de los modelos analíticos.

4.3.2. Validación de los modelos FN0 y W0 para estructuras marítimas ARJ de una cámara

Los resultados del ajuste obtenido para estructuras marítimas ARJ de una cámara son similares aplicando el modelo FN0 y el modelo W0, como se puede observar en la Tabla 4.1., siendo algo inferiores los correspondientes a oleaje regular.

p%	oleaje regular		oleaje irregular	
	RE _{FNO}	RE _{W0}	RE _{FNO}	RE _{W0}
13%	61.7%	62.9%	135.5%	137.2%
20%	29.1%	28.5%	18.7%	19.6%
26%	39.7%	26.6%	119.0%	98.6%
30%	44.6%	46.5%	53.4%	90.3%
40%	40.3%	47.7%	104.7%	67.1%
50%	11.8%	7.8%	39.5%	41.7%
Media	37.9%	36.7%	78.5%	75.8%

Tabla 4. 1. *rMSE de RE de los modelos FNO y W0 para ARJ de una cámara.*

Se trata, no obstante de errores altos en ambos casos que demuestran que el ajuste de los modelos originales no representa con exactitud el resultado de RE observado en los experimentos de ARJ de una cámara.

Las gráficas siguientes (Fig. 4.2. y 4.3.) muestran la bondad del ajuste del modelo FNO para oleaje regular e irregular en función de la porosidad. Hay que tener en cuenta que los modelos de pared con aberturas ranuradas son los de porosidad $p\%=20\%$, 30% , 40% y 50% , mientras que los de pared con aberturas tipo orificio son los de porosidad $p\%=13\%$, 26% y 35% .

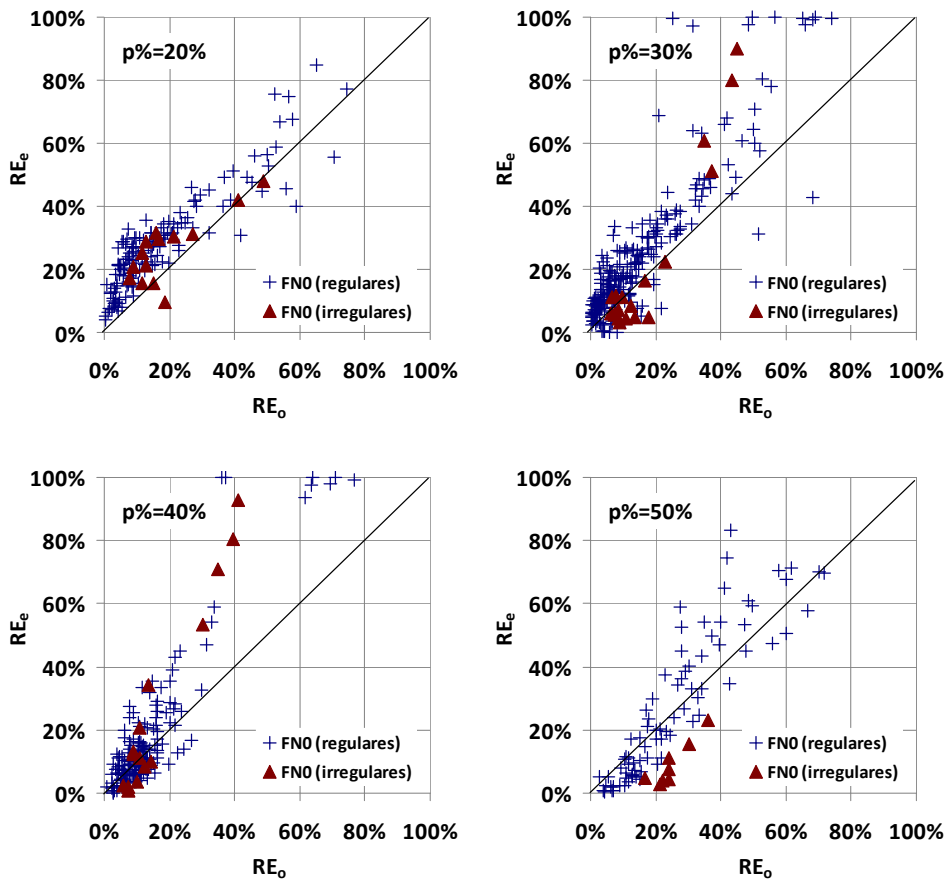


Figura 4. 2. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FNO para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

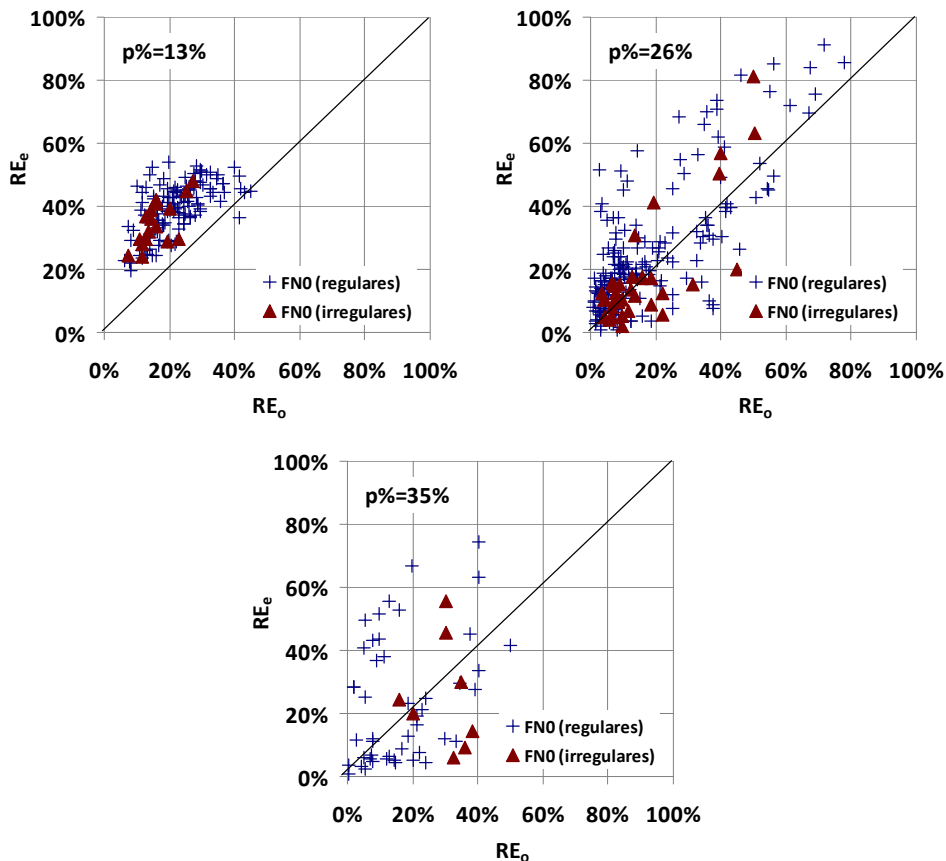


Figura 4. 3. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FNO para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

Las gráficas siguientes muestran la bondad del ajuste del modelo W0 para oleaje regular e irregular en función de la porosidad. Como en el caso del modelo FNO, los modelos de pared con aberturas ranuradas son los de porosidad $p\%=20\%$, 30% , 40% y 50% , mientras que los de pared con aberturas tipo orificio son los de porosidad $p\%=13\%$, 26% y 35% .

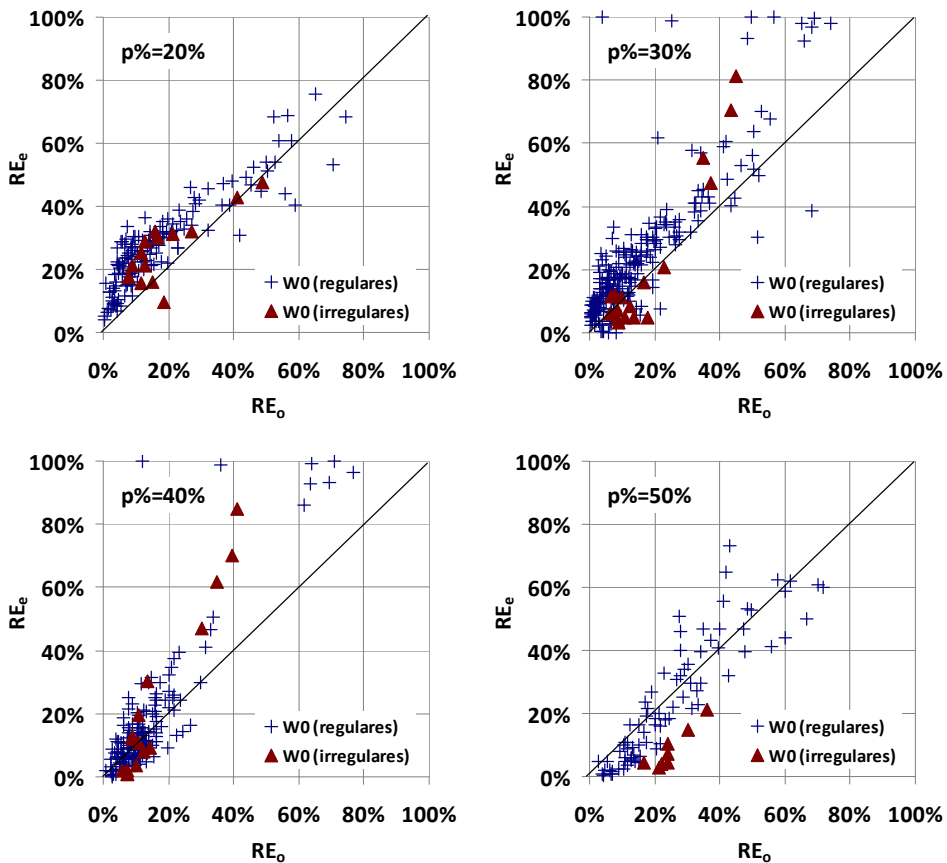


Figura 4. 4. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W0 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

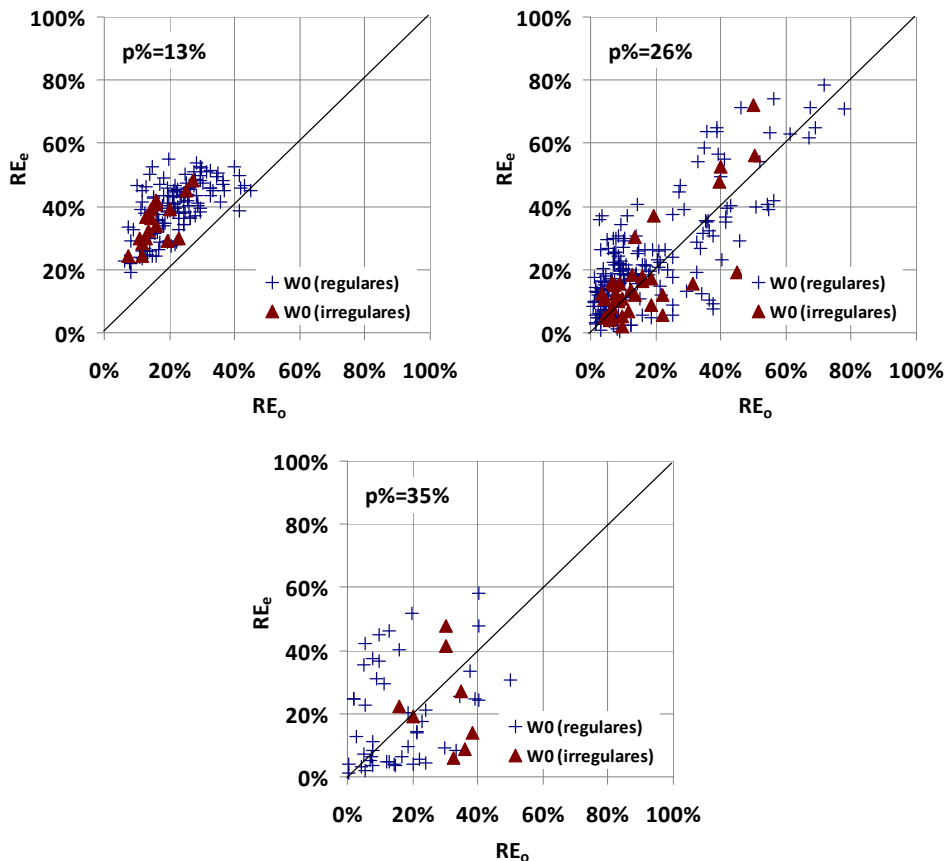


Figura 4. 5. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W0 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

En el caso de paredes con aberturas tipo orificios, los resultados experimentales no parecen ser tan buenos como los obtenidos en las cámaras perforadas de ranuras, en consecuencia, el ajuste con las fórmulas es peor y el resultado experimental muestra que los coeficientes de reflexión son mayores que con las ranuras para porosidades equivalentes.

En cuanto a la comparación entre modelos, no parece que la incorporación de la componente amortiguamiento por disipación en el interior de la cámara propuesta por el modelo W0 aporte en general un mejor ajuste que el obtenido con el modelo FNO.

No se puede establecer un intervalo concreto de porosidad óptima para el ajuste con el modelo W0, considerando como óptima aquella que permite obtener mejores ajustes; mientras que, para el ajuste con el modelo FNO, la porosidad óptima parece estar en el intervalo del $20\% < p < 30\%$.

4.3.3. Validación del modelo FNO y W0 para ARJ de dos cámaras

Los resultados del ajuste obtenido para ARJ de dos cámaras, por una parte, resulta mejor si se trata de oleaje irregular que si se trata de oleaje regular pero sí que se ven diferencias significativas entre los dos modelos, al verificarse que el modelo W0 no es adecuado para ARJ de dos cámaras, como se puede observar en la Tabla 4.2.

		oleaje regular		oleaje irregular	
p1%	p2%	RE _{FNO}	RE _{W0}	RE _{FNO}	RE _{W0}
13%	5%	130.7%	131.5%	145.4%	133.8%
30%	20%	154.8%	274.0%	29.7%	75.8%
35%	26%	133.9%	2926.3%	26.9%	1034.1%
40%	30%	162.8%	1523.9%	4.5%	33.5%
Media		145.6%	1213.9%	51.6%	319.3%

Tabla 4. 2. *rMSE de RE de los modelos FNO y W0 para ARJ de dos cámaras.*

Al igual que en el caso de ARJ de una cámara, se trata de errores altos que demuestran que el ajuste de los modelos originales no representa bien el resultado de RE observado en los experimentos de ARJ de dos cámaras.

Las gráficas siguientes (Fig. 4.6 y 4.7) muestran la bondad del ajuste del modelo FNO para oleaje regular e irregular y 4 combinaciones de pared con aberturas distintas. Las tipologías ensayadas de pared con aberturas ranuradas son los de porosidad $p1%=30\%-p2%=20\%$, y $p1%=40\%-p2%=30\%$, mientras que los de pared con aberturas tipo orificio son los de porosidad $p1%=13\%-p2%=5\%$, y $p1%=35\%-p2%=26\%$, siendo en ambos casos $p1\%$ la porosidad de la pared frontal y $p2\%$ el índice de porosidad de la pared intermedia.

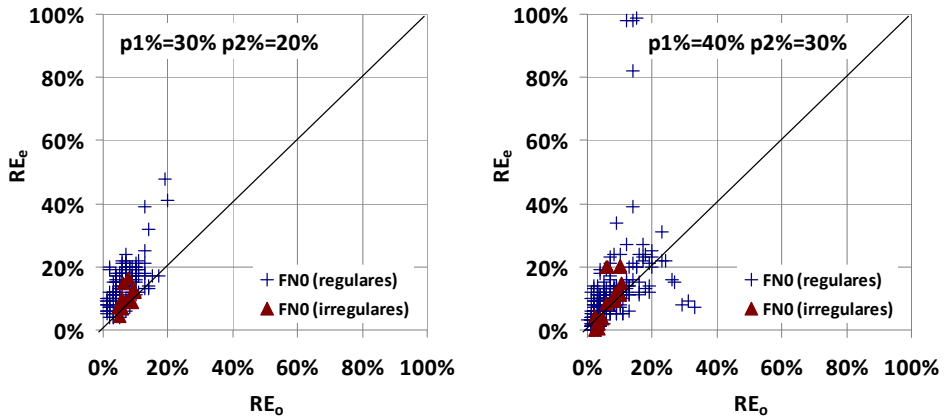


Figura 4. 6. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FNO para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura

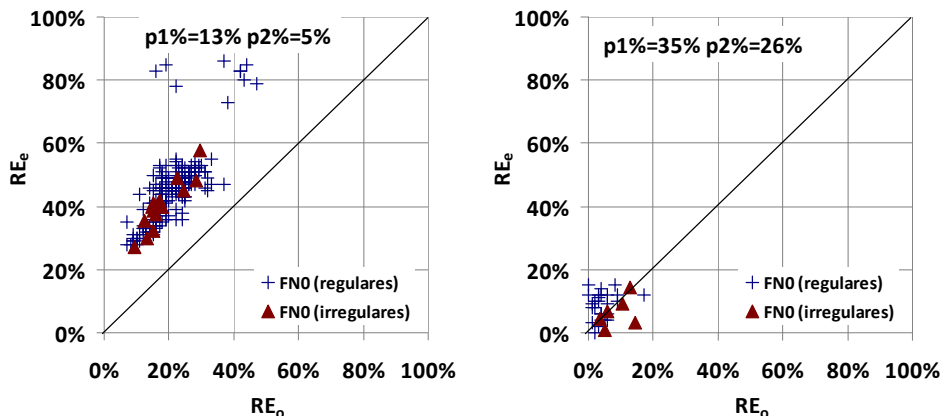


Figura 4. 7. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FNO para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio

Las gráficas siguientes (Fig. 4.8 y 4.9) muestran la bondad del ajuste del modelo W0 para oleaje regular e irregular, con las mismas cuatro combinaciones.

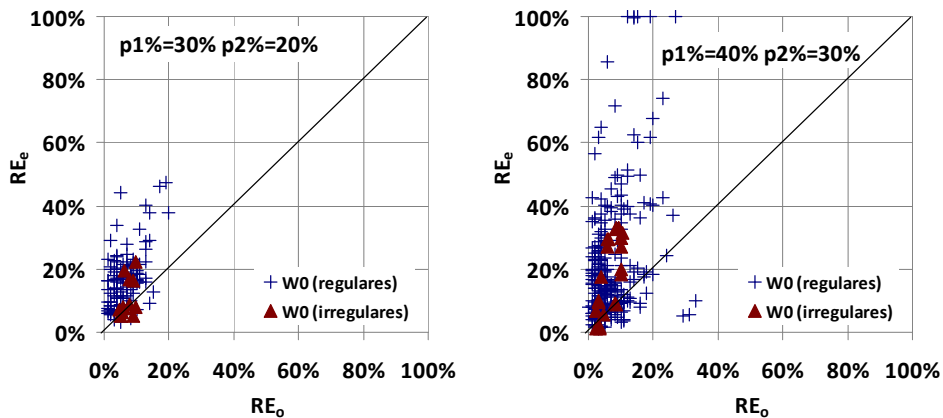


Figura 4. 8. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W0 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura

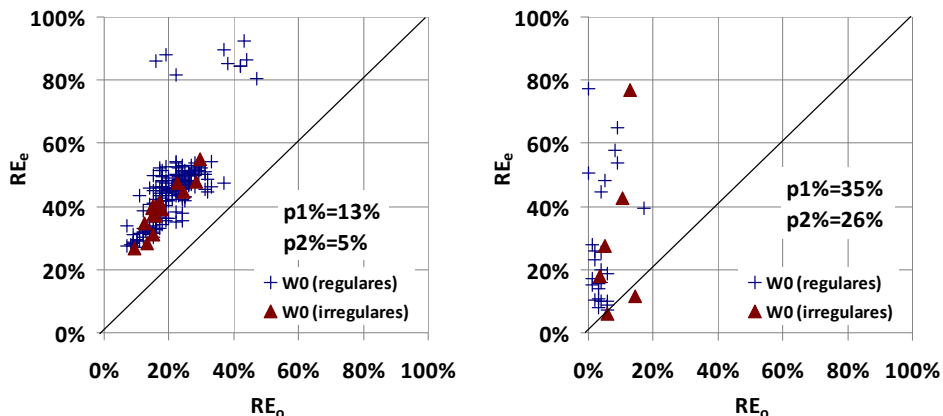


Figura 4. 9. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W0 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio

En el ARJ de dos cámaras, se vuelve a constatar que las fórmulas sobreestiman el resultado del RE, aunque no tanto el modelo FNO como el modelo W0.

Por otro lado, las diferencias entre aplicar el modelo FNO o el modelo W0 es significativa, quedando la estimación con el modelo FNO más próximo a los resultados experimentales, no siendo relevante el índice de porosidad en el ajuste de las fórmulas, ya que es similar en el caso de porosidad baja y para porosidades mayores.

En resumen, la validación de los resultados experimentales con los modelos de FNO y W0 muestran que, debido a que los modelos fueron calibrados con un número limitado de ensayos y porosidades, el ajuste de los resultados no se ajusta de forma adecuada a un rango más amplio de experimentos y porosidades, como el realizado para esta Tesis Doctoral. Esto lleva a realizar, como se describe en el siguiente apartado, un nuevo ajuste de los coeficientes empíricos en los modelos FNO y W0.

4.4. Validación de los nuevos modelos FN1 y W1

4.4.1. Ajuste de los modelos FN0 y W0

Para mejorar los modelos FN0 y W0, se modifica el coeficiente empírico α descrito en el apartado 4.2. cuya expresión es [4.1]. Este coeficiente depende de la porosidad, p , y del coeficiente de descarga, C_c . Originalmente, el coeficiente propuesto en el modelo FN0 y W0 toma un valor de 0,55; sin embargo, este coeficiente puede ser ajustado con los nuevos datos experimentales y encontrar una relación con respecto a la porosidad.

El procedimiento de ajuste ha consistido en reproducir la estimación de RE con el modelo FN0 y oleaje regular, dando diferentes valores al coeficiente de descarga, C_c . Como resultado, se ha obtenido el error, rMSE, cometido para cada α dado respecto de C_c y, de ahí, el valor de coeficiente empírico α que mejor resultado de ajuste da para cada porosidad.

En las siguientes gráficas se observa para qué valor de C_c se obtiene el mínimo error del ajuste entre el valor RE estimado y el RE observado, para diferentes porosidades, en modelos una cámara con ranuras (Fig. 4.10), una cámara con orificios (Fig. 4.11), dos cámaras con ranuras (Fig. 4.12) y dos cámaras con orificios (Fig. 4.13).

Para el caso de ARJ de una cámara, se ha obtenido el valor de C_c que da un mínimo de error rMSE. Para el caso de ARJ de dos cámaras, se muestra el resultado del ajuste del coeficiente de descarga, C_c , correspondiente a la pared perforada de la cámara frontal, ya que no hay diferencias significativas en el resultado del error al cambiar el valor de C_c correspondiente a la pared perforada de la cámara posterior.

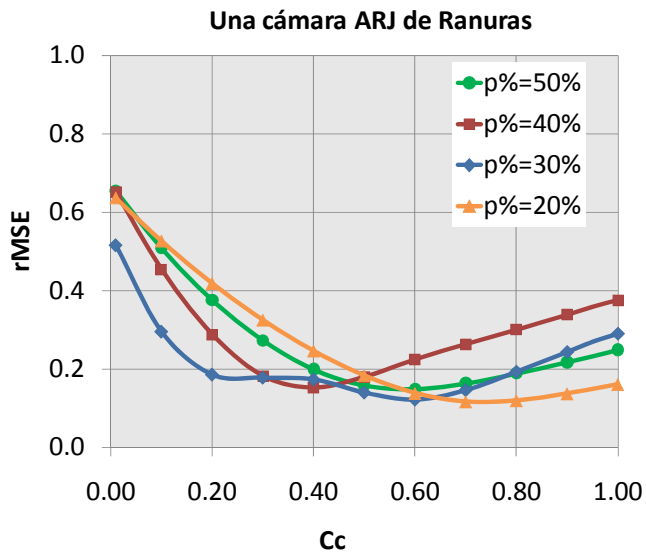


Figura 4. 10. Ajuste de C_c para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

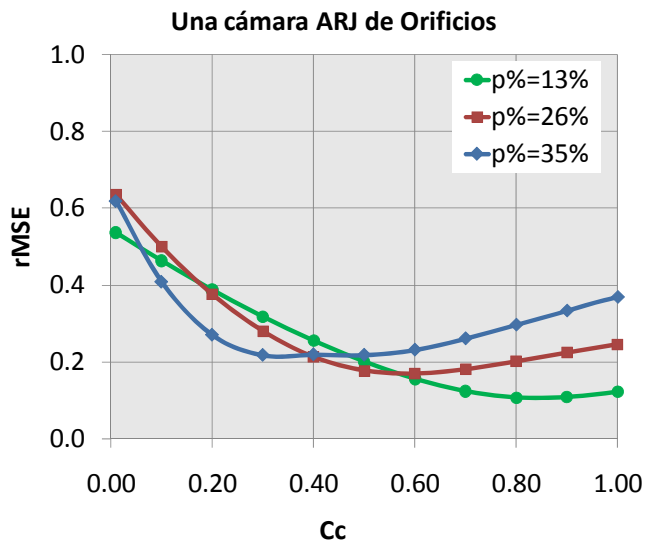


Figura 4. 11. Ajuste de C_c para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

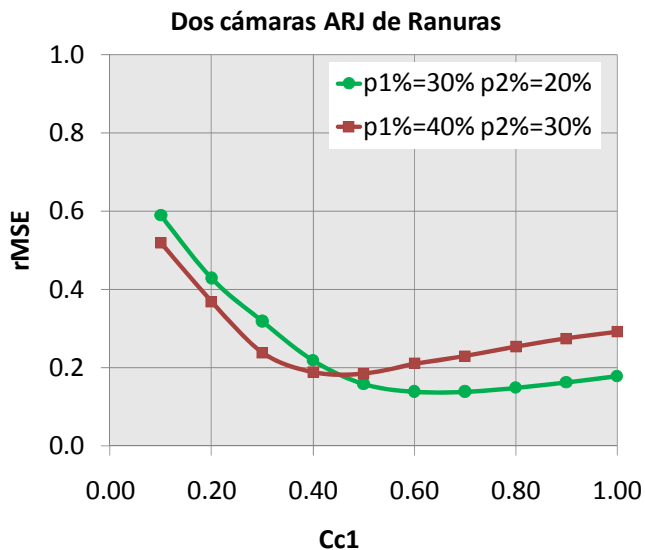


Figura 4.12. Ajuste de $Cc1$ para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranuras

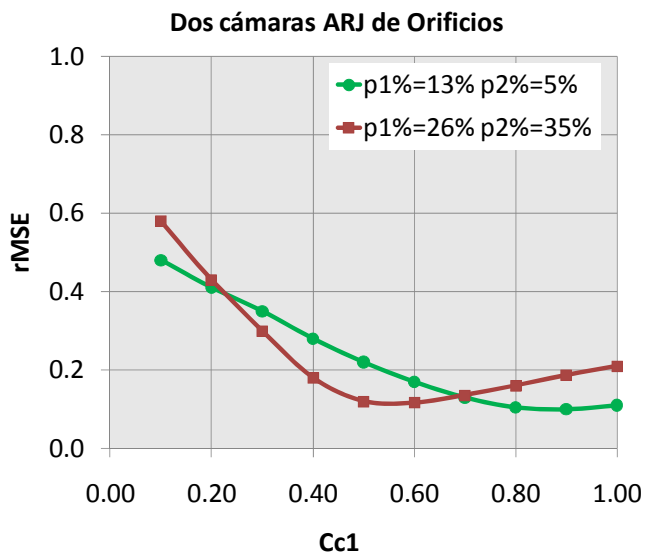


Figura 4.13. Ajuste de $Cc1$ para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificios

El procedimiento seguido para encontrar el ajuste logarítmico del coeficiente de descarga má adecuado a los resultados observados es el siguiente:

(1) se calcula RE para valores del coeficiente $0 \leq C_c \leq 1$, con el modelo FNO y se compara con el error observado REo, para cada tipología e índice de porosidad.

(2) Se toma como C_c óptimo de cada caso el que resulta un rMSE mínimo.

(3) Se ajusta la función α de óptimos en función del índice de porosidad.

El resultado de este proceso de ajuste del coeficiente α indica que, para obtener mejores ajustes en cada índice de porosidad, el coeficiente varía influenciado por la porosidad, $p\%$, según una función que permite ser formulada según la expresión [4.4] (ver Fig. 4.14):

$$\alpha = -44 \ln(p) - 16 \quad [4.4]$$

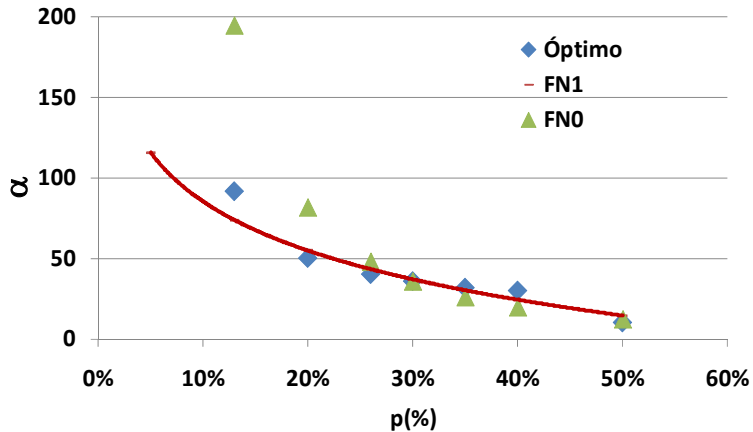


Figura 4. 14. Ajuste de coeficiente α vs. $p\%$

4.4.2. Validación de los modelos FN1 y W1 para ARJ de una cámara

A partir de la nueva expresión [4.4] del coeficiente α , se aplica el procedimiento de validación similar al descrito en el apartado 4.3. para los nuevos modelos FN1 y W1 resultantes, obteniendo los resultados que se muestran a continuación para ARJ de una cámara.

Se ha conseguido una notable mejoría del ajuste con respecto a los modelos originales (ver Tabla 4.1 y 4.2), mejor para oleaje regular que para oleaje irregular (Tabla 4.3); sin embargo, aún no se han encontrado las mejores relaciones entre las variables que influyen en la obtención del RE observado experimentalmente. Los resultados gráficos del ajuste para aberturas de la pared perforada tipo ranura y tipo orificio se muestran en la Figuras 4.15 y 4.16, respectivamente.

p%	oleaje regular		oleaje irregular	
	RE _{FN1}	RE _{W1}	RE _{FN1}	RE _{W1}
13%	22.1%	19.9%	7.0%	7.2%
20%	20.4%	16.6%	7.4%	7.7%
26%	41.1%	32.2%	124.0%	101.4%
30%	44.3%	38.2%	136.8%	88.6%
40%	34.4%	30.0%	87.7%	55.7%
50%	10.5%	8.7%	47.0%	48.6%
Media	28.8%	24.3%	68.3%	51.5%

Tabla 4. 3. *rMSE de REe (estimado) respecto de REo (observado) de los modelos FN1 y W1 para ARJ de una cámara.*

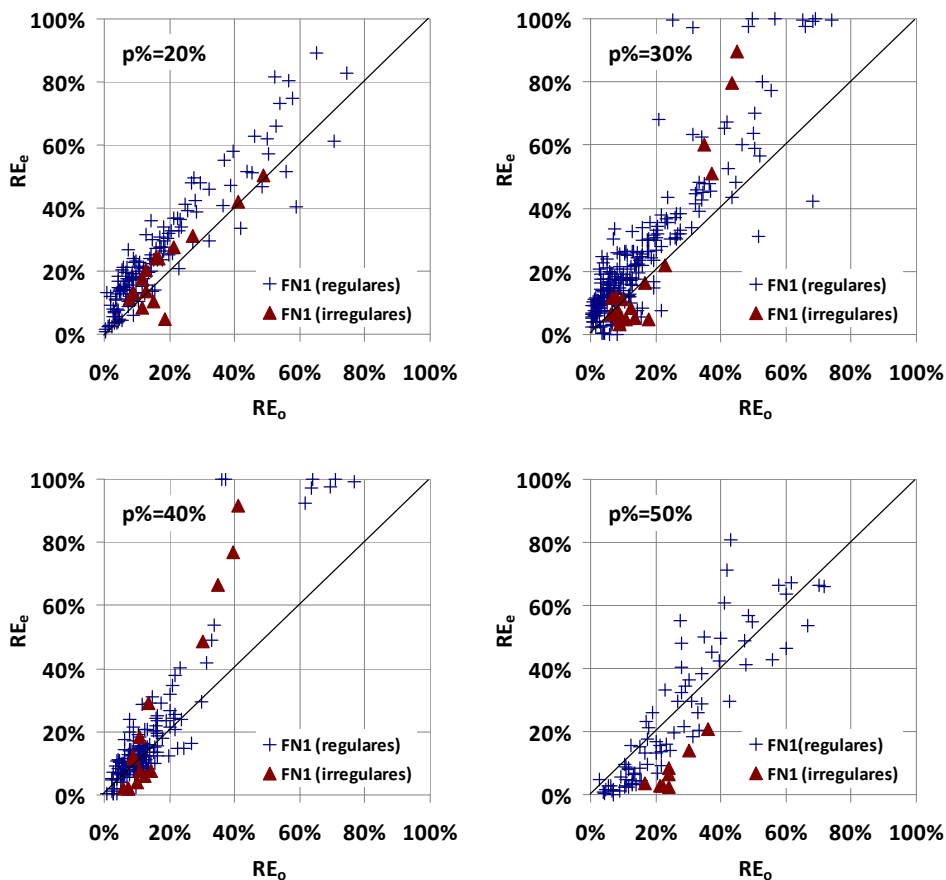


Figura 4. 15. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FN1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

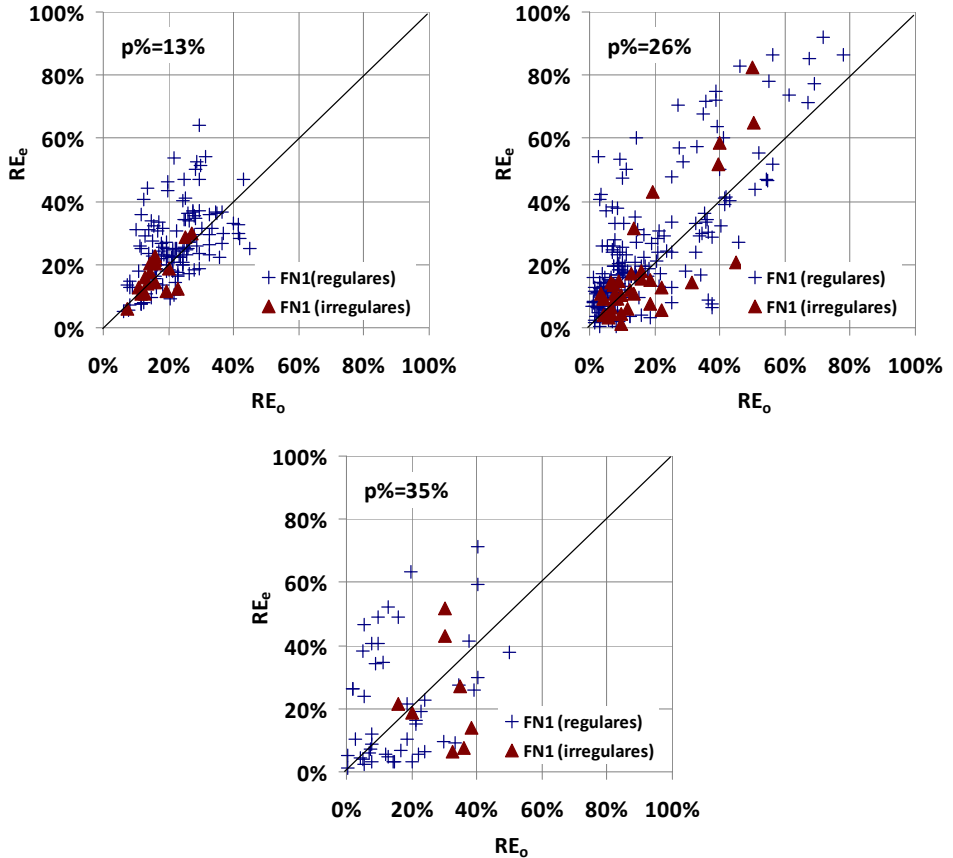


Figura 4. 16. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FN1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

Las gráficas siguientes (Fig. 4.17 y 4.18) muestran la bondad del ajuste del modelo W1 para oleaje regular e irregular en función de la porosidad. Como en el caso del modelo FN1, los modelos de pared con aberturas ranuradas son los de porosidad $p\%=20\%$, 30% , 40% y 50% , mientras que los de pared con aberturas tipo orificio son los de porosidad $p\%=13\%$, 26% y 35% .

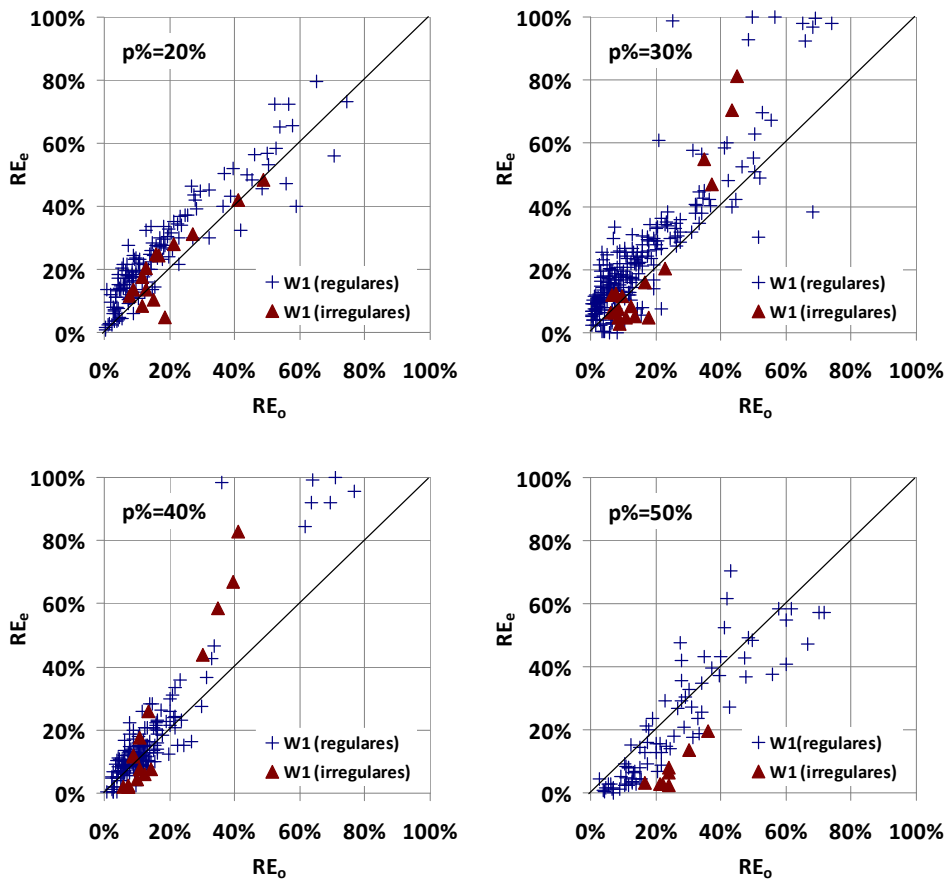


Figura 4. 17. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

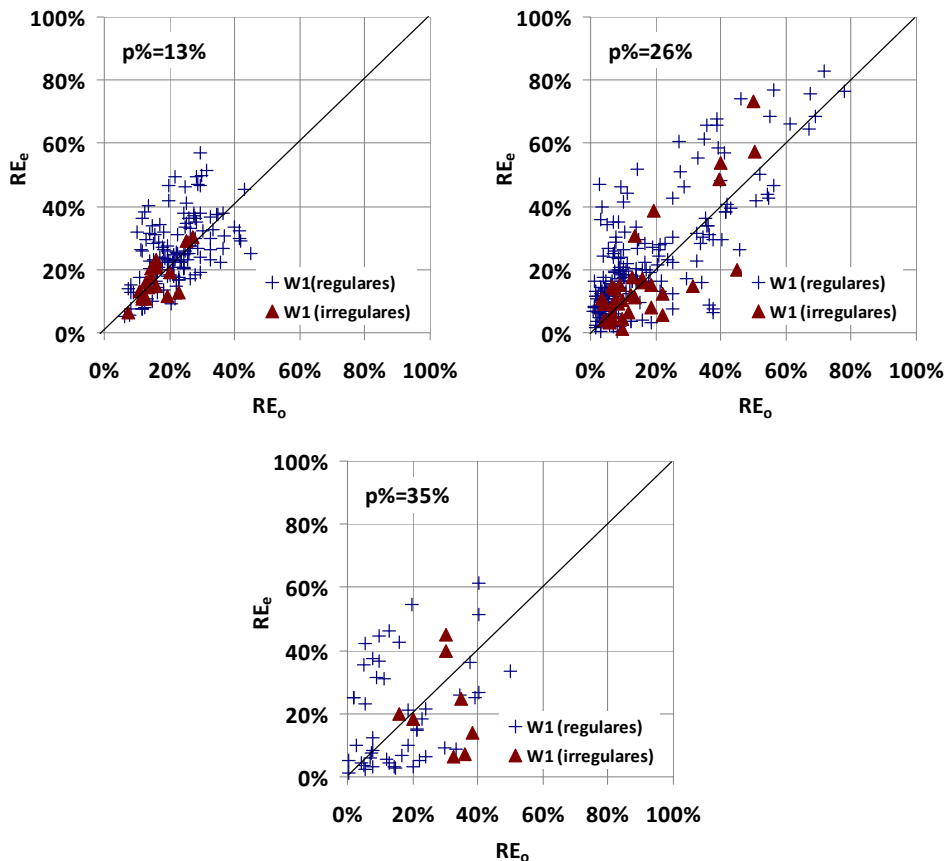


Figura 4. 18. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W1 para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

4.4.3. Validación de los modelos FN1 y W1 para ARJ de dos cámaras

Al igual que en el caso de modelos ARJ de una cámara, a partir de la nueva expresión [4.4] del coeficiente α , se aplica el procedimiento de validación similar al descrito en el apartado 4.3. para los nuevos modelos FN1 y W1 resultantes, obteniendo los resultados que se muestran a continuación para ARJ de dos

cámaras. Como ocurría en el caso del modelo FN0 y W0, el ajuste es mejor para el caso de oleaje irregular que para oleaje regular, aunque no llega a ser un buen ajuste.

		oleaje regular		oleaje irregular	
p1%	p2%	RE _{FN1}	RE _{W1}	RE _{FN1}	RE _{W1}
13%	5%	22.6%	19.8%	10.4%	7.9%
30%	20%	145.8%	146.4%	30.1%	81.4%
35%	26%	165.5%	106.8%	23.1%	994.4%
40%	30%	167.4%	281.6%	5.9%	25.4%
Mean		125.3%	138.7%	17.4%	277.3%

Tabla 4. 4. *rMSE de RE de los modelos FN1 y W1 para dos cámaras ARJ.*

Las siguientes gráficas (Fig. 4.19 y 4.20) muestran el resultado del ajuste con el modelo FN1 y ARJ de dos cámaras, tanto para el caso de oleaje regular como irregular y para las mismas cuatro combinaciones ensayadas.

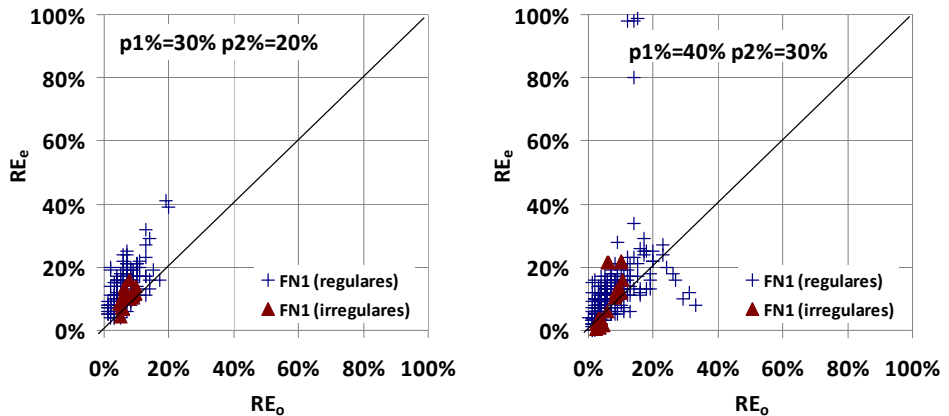


Figura 4. 19. *Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FN1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura*

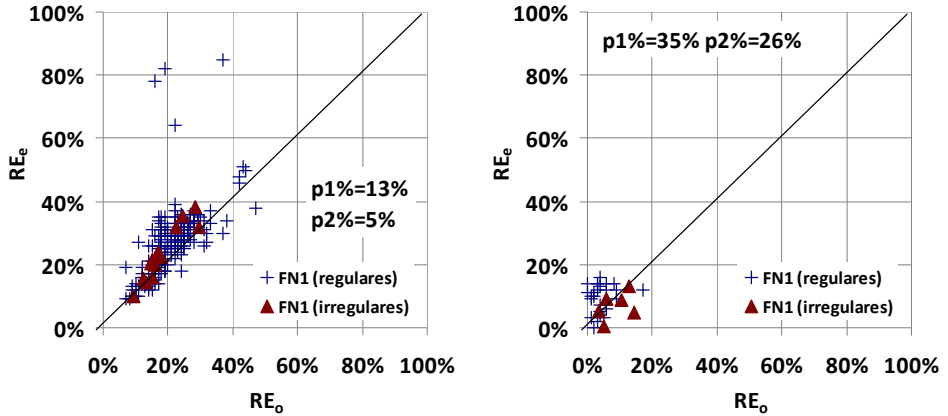


Figura 4. 20. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo FN1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio

En cuanto a la RE estimado con el modelo W1 para ARJ de dos cámaras, en las figuras se muestra (Fig. 4.21 y 4.22) como el ajuste es peor que el conseguido con el modelo FN1.

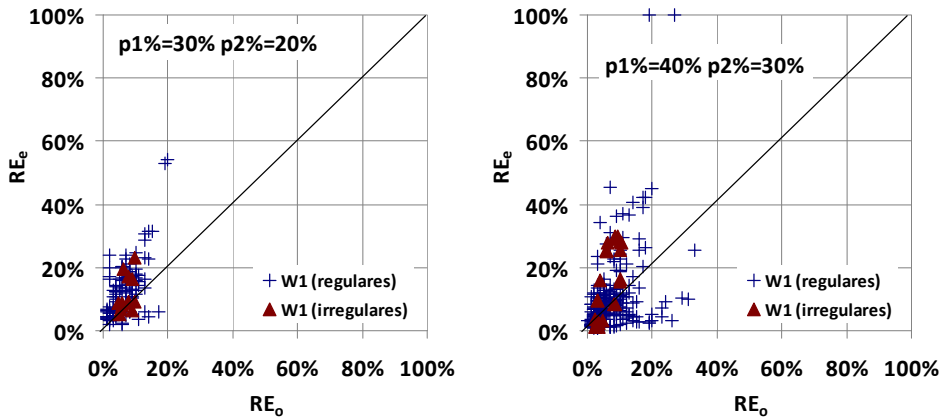


Figura 4. 21. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo ranura

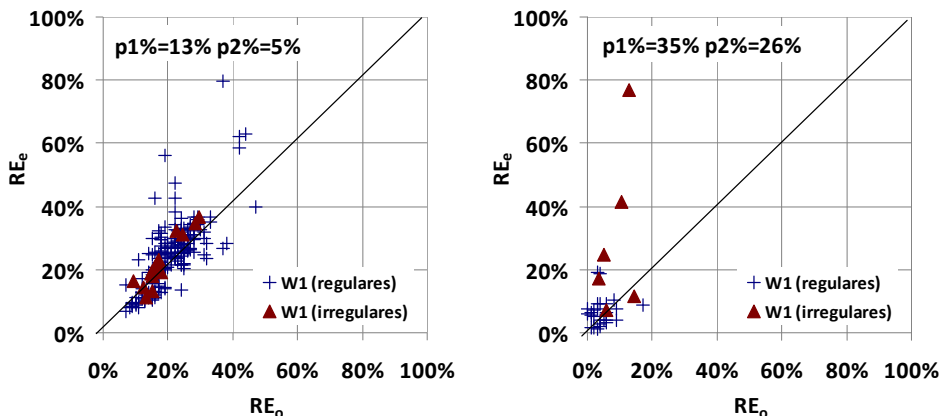


Figura 4. 22. Ajuste de RE_e (estimado) respecto de RE_o (observado) con el modelo W1 para ARJ de dos cámaras y aberturas tipo orificio

4.5. Consideraciones del ajuste con los modelos analíticos

La estimación de la energía reflejada para cada experimento que se obtiene de los modelos analíticos, han sido mejor ajustados empíricamente con nuevos ensayos y rangos más amplios de los parámetros B/L , H/L y $p\%$ que los originalmente previstos por los modelos FN0 y W0; no obstante, el ajuste no es todo lo bueno que sería deseable. Como consecuencia de ello, y para tratar de encontrar las relaciones entre variables que explique de forma más precisa el fenómeno de la reflexión en este tipo de estructuras, se van a utilizar técnicas de redes neuronales podadas, cuyas ventajas principales consisten en que son capaces de encontrar relaciones complejas y no-lineales entre las variables, por un lado, y, por otro lado, pueden determinar qué variables son más influyentes al objeto de descubrir las relaciones no-lineales que parecen existir entre las variables y que escapan a los modelos lineales que se han aplicado.

En la aplicación de estas técnicas se toma como variable fundamental el resultado de estimar la RE a partir del modelo analítico FN1, que es el que ha dado mejores ajustes, tanto en tipologías de ARJ de una cámara, como en tipologías de ARJ de dos cámaras.

El resultado de aplicar estas técnicas se describe en el siguiente capítulo de la Tesis Doctoral.

CAPÍTULO 5

Modelación neuronal

Capítulo 5

Modelo neuronal

5.1. *Introducción*

Para obtener un mejor ajuste de los resultados experimentales a los modelos analíticos, es necesario encontrar las relaciones no lineales que existen entre las variables involucradas en el fenómeno, lo cual es difícil de ver con el uso de modelos analíticos basados en la teoría lineal. Sin embargo, los modelos analíticos se pueden completar con los resultados de la aplicación de técnicas de Redes Neuronales (NN) (*“Neural Networks”, en inglés*) en conjunción con Estrategias Evolutivas (ES) (*“Evolutionary Strategies”, en inglés*) que ayuden a descubrir las relaciones subyacentes entre las variables involucradas, y que, una vez deducidas estas relaciones y las variables que más influyen, den lugar a una reformulación del modelo analítico.

Este es el objetivo de este capítulo, en el que se describe la técnica de NN+ES, se establecen los modelos neuronales que expliquen el fenómeno objeto

de estudio tanto para ARJ de una cámara como de dos cámaras, a partir de estos modelos se generan ensayos sintéticos mediante simulación que son los que, en último término, permiten establecer las relaciones existentes entre las variables influyentes.

Por último, se presenta una nueva fórmula obtenida de introducir las nuevas relaciones deducidas del modelo neuronal al modelo analítico modificado FN1 y se comparan las estimaciones de la fórmula con resultados de otros autores.

5.2. Redes Neuronales podadas con Estrategias Evolutivas: NEUROPORT 3.0

Las redes neuronales son técnicas de optimización habituales en inteligencia artificial (ver Ansari and Hou, 1997) que se han extendido y aplicado a la solución de problemas en múltiples campos (ver Soulié and Gallinari, 1998). Están inspiradas en el funcionamiento del sistema nervioso de los animales y los conceptos utilizados tales como neuronas, axón y uniones sinápticas, en las cuales se encuentra la relación entre las variables de entrada y las de salida en el modelo de NN.

Las NN se pueden considerar métodos no lineales multi-paramétricos de regresión que son capaces de encontrar relaciones complejas y no lineales entre las entradas y las salidas, que desde hace años se han propuesto para resolver numerosas aplicaciones de Ingeniería Civil. En ellas, se suelen utilizar redes “feed-forward” multicapa (capa de entrada, capas intermedias y capa de salida) con una sola capa intermedia y el algoritmo de propagación inversa (“backpropagation”) en el proceso de aprendizaje.

Con esta metodología, Mase et al. (1995) analizó datos de estabilidad de diques y Van Gent and Van den Boogaard (1998) estudió las fuerzas horizontales sobre diques verticales. Sin embargo, esta metodología tiene el inconveniente de tener que elegir arbitrariamente el número de neuronas en la capa intermedia, con riesgo de sobreaprendizaje por un lado (demasiadas neuronas, un error de chequeo muy superior al de aprendizaje) o de generar una red demasiado simple (pocas neuronas, errores de aprendizaje y chequeo grandes). Para evitar los problemas de sobreaprendizaje asociados a las redes totalmente conexas (modelo con muchos parámetros) y los algoritmos de propagación inversa, Medina et al. (2002) propuso utilizar la cristalización simulada o recocido simulado ("*Simulated Annealing*") para definir redes neuronales podadas apropiadas a la modelación del rebase observado en diques rompeolas. La cristalización simulada optimizó simultáneamente los parámetros de la red neuronal y su topología, desconectando entradas, conexiones y neuronas que no eran significativas para explicar las observaciones.

De entre las diferentes herramientas que pueden usarse para la aplicación de de NN+ES, se ha emplea la herramienta software NEUROPORT 3.0 (Figueres et al., 2005), que parte de un software anterior NEUROPORT (Redes NEURONales para el análisis de sistemas causales en el ámbito PORTuario) (Medina, 2003) que estaba basado en un sistema inteligente híbrido de estrategia evolutiva y cristalización simulada que optimiza una red neuronal multicapa supervisada de alimentación directa. La única limitación técnica para su aplicación es la necesidad de tener identificadas a priori las variables "causa" y las variables "efecto" que definen total o parcialmente el proceso que se pretende analizar y modelar. Este modelo híbrido de programación evolutiva, redes neuronales y cristalización

simulada ha mostrado su superioridad frente a otros métodos convencionales de redes neuronales basados en algoritmos de propagación inversa que optimizan por gradiente cuando el volumen de datos de aprendizaje es pequeño.

NEUROPORT 3.0 (Figueres et al., 2005) es un programa de redes neuronales que emplea algoritmos genéticos y un método de gradiente para la optimización de parámetros de la red. Permite entrenar redes neuronales podadas y realizar un análisis de selección de variables de entrada de la red y pueden utilizarse para relacionar cualquier número de variables de entrada y de salida, realizan la optimización de redes con métodos de tipo gradiente y utiliza el concepto de factor de precisión dando más peso a los datos de mayor calidad. Además, la posibilidad de encontrar las relaciones no-lineales existentes entre las variables que explican un fenómeno es especialmente interesante para el objeto de esta Tesis Doctoral. La modelación neuronal puede considerarse una regresión no lineal multivariada. Si existe una relación no lineal entre las variables de entrada y salida, el aprendizaje neuronal la encontrará y la definirá en la estructura y parámetros de la red. No importa lo compleja y no lineal que puedan ser las relaciones entre las variables, el modelo neuronal puede emularlas en su estructura. Esta propiedad de las redes neuronales puede ponerse a prueba generando ficheros de datos con relaciones no lineales complejas conocidas y dejando que NEUROPORT modele las relaciones entre las variables (desconocidas para el modelo neuronal).

Por otro lado, las redes neuronales son especialmente aplicables a la modelación no lineal multivariada de procesos de los que se dispone un gran volumen de datos y en aquellos en los que alguna de las variables de entrada puede no ser influyente en el resultado. En efecto, una red neuronal típica “feed-

forward” puede tener decenas de parámetros y necesitar cientos de datos para realizar un correcto aprendizaje. La función objetivo del programa NEUROPORT utiliza el PSE (Moody, 1992) (“predicted squared error” en inglés) en lugar del típico MSE (“mean squared error” en inglés) favoreciendo la eliminación de neuronas y conexiones en la topología de la red. $PSE = MSE[1 + 2P/(N - P)]$, donde P es el número de parámetros libres y N es el número de datos de aprendizaje. El resultado es una red de complejidad adaptada al volumen de datos disponible.

Se trata de una estrategia evolutiva que permite optimizar los valores y la topología de una red neuronal multicapa supervisada de alimentación directa. A partir de una población inicial de redes neuronales aleatorias, la estrategia evolutiva va modificando parámetros y topología de la red hasta llegar a un óptimo que equilibra la complejidad de la red y la precisión de su modelación.

El proceso de aprendizaje de la red neuronal persigue obtener la red neuronal que mejor relaciona las entradas y las salidas de los datos de aprendizaje (“learning”). Terminado el proceso de aprendizaje, se debe comprobar que esa relación entradas-salidas se mantiene también con los datos de chequeo (“testing”) que no han sido utilizados en el proceso de aprendizaje. Si los errores de aprendizaje y chequeo son similares, puede considerarse validada la red neuronal (el proceso aprendizaje+chequeo se denomina validación cruzada) y se puede dar por bueno el modelado del proceso. Si los datos se refieren a resultados experimentales de un canal de ensayos, el modelo neuronal puede considerarse un canal de ensayos virtual capaz de proporcionar una estimación de las variables de salida para unas entradas que se pueden elegir a voluntad.

Así pues, NEUROPORT 3.0 desarrolla una estrategia evolutiva para determinar la red neuronal (estructura y parámetros) que mejor se ajusta a un

conjunto de patrones de aprendizaje. En general, el resultado de la evolución es una red neuronal podada que equilibra de forma óptima el número de parámetros de la red y la precisión de la estima que produce sobre los datos de aprendizaje. En general, las redes neuronales así obtenidas no suelen tener problemas de sobreaprendizaje (error de chequeo muy superior al de aprendizaje). Para describir sistemáticamente el método utilizado en el programa, se describen a continuación los diferentes elementos utilizados y algunas de sus características. Las neuronas sigmoidales y lineales realizan las operaciones expresadas en las expresiones [5.1] y [5.2].

$$x_j = \frac{1}{1 + \exp \left[(1 + \beta_j) \left(\alpha_j - \sum_{i=1}^{i=N_k} W_{ij} x_{ij} \right) \right]} \quad [5.1]$$

$$x_j = \alpha_j + \sum_{i=1}^{i=N_k} W_{ij} x_{ij} \quad [5.2]$$

donde x_{ij} es la señal enviada de la neurona i (capa k) a la neurona j (capa $k+1$), α_j y β_j son los parámetros neuronales, N_k es el número de neuronas en la capa k , W_{ij} es el parámetro de amplificación que conecta la neurona i (capa k) con la neurona j (capa $k+1$) y x_j es la salida de la neurona j (capa $k+1$). Un determinado modelo neuronal se caracteriza por el conjunto de parámetros $\{\alpha_j, \beta_j\}$ y $\{W_{ij}\}$.

La figura siguiente muestra el esquema de una red neuronal totalmente conexionada del tipo “feed-forward” con una capa de entrada (variables de entrada) una capa de salida (variables de salida) y dos capas intermedias u ocultas. En general, sólo se utiliza una capa intermedia en la mayoría de aplicaciones.

NEUROPORT 3.0 utiliza neuronas de entrada sin transformación, neuronas de capas intermedias lineales o sigmoideas (a definir por el usuario) y neuronas de salida lineales.

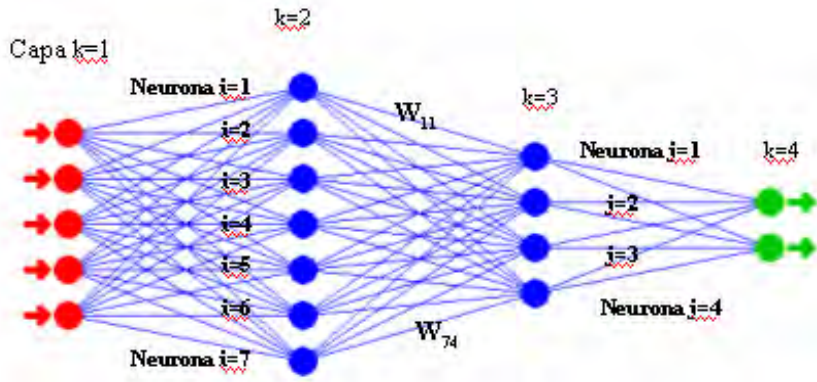


Figura 5.1. Topología de una NN totalmente conexcionada

NEUROPORT 3.0 parte de una estructura de red máxima totalmente conexcionada que la define el usuario, como la señalada en la figura anterior, en general con muchos parámetros, define poblaciones de redes neuronales de este tipo con parámetros aleatorios muy pequeños y deja que el proceso evolutivo (selección de los mejor modelos) vaya modificando los valores de los parámetros y la propia estructura de la red (eliminando parámetros neuronales y conexiones entre neuronas) hasta conseguir un modelo neuronal óptimo desde el punto de vista del error generalizado PSE. La búsqueda del PSE óptimo implica simultáneamente la búsqueda de modelos neuronales más simples y de mayor precisión. La Fig. 5.2 describe un ejemplo de estructura de una red neuronal evolucionada.

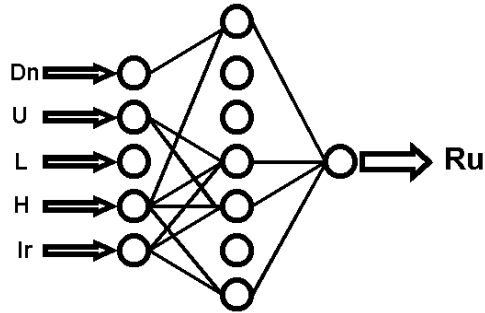


Figura 5.2. Topología de NN podada

5.3. Modelos neuronales

5.3.1. Consideraciones iniciales

Se han utilizado modelos NN optimizados con ES mediante la aplicación de la herramienta NEUROPORT 3.0 (Figueres et al., 2005), anteriormente descrita, al objeto de eliminar el ruido experimental y para analizar la relación no lineal entre la variable salida del modelo, que es el porcentaje de energía reflejada (RE), y las variables de entrada del modelo, que son los parámetros estructurales y las variables de oleaje.

Es de destacar que, además de las variables de entrada referidas, se ha incluido el resultado de la estimación de energía reflejada obtenida por el modelo analítico FN1, RE_{FN1} , por lo que el objetivo que se pretende alcanzar con el modelo neuronal es que sea capaz de modelizar la relación no-lineal existente que el modelo analítico no ha conseguido encontrar; así como, mostrar cuáles son las variables de entrada que tiene una mayor influencia en estas relación.

A continuación, se presentan las topologías de los modelos ARJ obtenidos para una cámara y para dos cámaras, así como los modelos resultantes del proceso evolutivo.

5.3.2. Modelo ARJ de una cámara

Las variables estructurales consideradas para ARJ de una cámara son: B = ancho de cámara, $p\%$ = porosidad y h = profundidad del agua.

La Figura 5.3. muestra un esquema de la geometría de los modelos de una cámara.

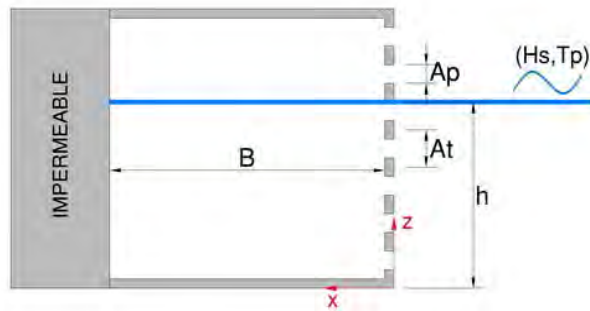


Figura 5.3. Esquema de modelo ARJ de una cámara

5.3.2.1. Oleaje regular

Las variables de oleaje consideradas para optimizar el modelo regular son: H_i = altura de ola incidente y L_i = longitud de onda correspondiente al período de onda incidente T_i (s).

Es conveniente utilizar variables adimensionales relevantes para facilitar el proceso de optimización de modelos NN. Las siguientes variables adimensionales son tomados como insumos de la red para cámara de 1-ARJ: B/L , H/L , H/h y p .

El modelo neuronal ARJ de una cámara y oleaje regular parte de las siguientes características:

- Variables de Entrada (5):

E1 (ancho de cámara relativo a la longitud de onda)= B/L

E2 (peralte de la ola)= H/L

E3 (altura de ola relativa a la profundidad)= H/h

E4 (porosidad de la pared perforada)= p

E5 (% energía reflejada estimada por el modelo analítico

FN1) = RE_{FN1}

- Variables de Salida (1):

S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

- Número total de ensayos: 965

A partir de estas características y según las propias recomendaciones de la aplicación en función del número de ensayos disponibles y de las variables de entrada y salida existentes, la red tiene la siguiente topología inicial (Fig. 5.4):

- Neuronas en capa oculta: 7 (1 de las cuales es lineal)
- Número de parámetros: 56
- Ensayo para entrenamiento: 761
- Ensayos para validación: 107
- Ensayos para test: 97

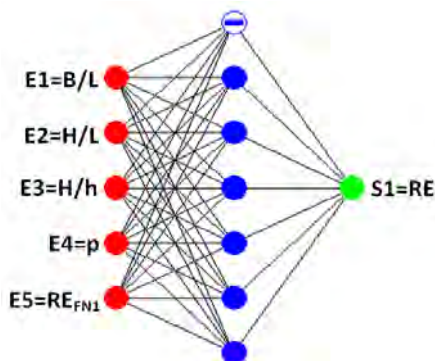


Figura 5.4. Topología inicial de la red para ARJ una cámara y oleaje regular

La configuración del genético que caracteriza la estrategia evolutiva se muestra en la Fig. 5.5. Esta configuración se usa para todos los modelos que se han generado, de 1 y 2 cámaras y de oleaje regular e irregular.

Población		Mutaciones	
Número de Padres	100	Factor de mutación (F)	2
Número de Hijos	100	Probabilidad de mutación (F/1)	1 %
Generaciones	500	Probabilidad de mutación (F/10)	2 %
Grad. Mín. en 10% Gen.	0.000001	Probabilidad de mutación (F/100)	4 %
Comprobar Cada X%	10	Probabilidad de mutación (F/1000)	8 %
Configuración de Cálculo del PSE		Prob. de mutar Booleanas (Min)	0.05 %
P0	0	Prob. de mutar Booleanas (Max)	0.5 %
K	1	Cambiar Prob. Bool. Cada %Gen	10 %
Alfa	2	Exponente selección padres	1
<input checked="" type="checkbox"/> Calcular Ne		Activar Mutación sólo Bool Entrada	<input type="checkbox"/>
		Mutar sólo Bool Entrada cada %Gen	10
		Alfa (Gradiente)	0.01
		Delta X (Gradiente)	0.001

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \cdot (|T_i - Y_i|)^{\alpha}}{N}$$

$$N_e = \frac{N^2}{\sum_{i=1}^N \omega_i^2}$$

$$PSE = \Delta \cdot \left[1 + \frac{2(P + P_0)}{nS \cdot K \cdot N_e - (P + P_0)} \right]$$

Figura 5.5. Caracterización de la estrategia evolutiva (ES)

Una vez introducidos los datos de entrada y configurada la red, el proceso de optimización da como resultado una nueva red en la que se han reducido el número de conexiones, de neuronas en la capa oculta, de variables de entrada y, en consecuencia, el número de parámetros.

De la selección de redes optimizadas como mejores para cada combinación de variables de entrada que se tienen en cuenta, finalmente, se ha seleccionado la red cuyas variables de entrada son la E4 y E5, que tiene el error mínimo en la estimación de RE en relación al número de variables de entrada que participan del modelo. La topología final de la red queda definida según las siguientes características (Fig. 5.6):

- Neuronas en capa oculta: 6 (1 de las cuales es lineal)
- Número de parámetros: 28
- Variables de Entrada (2):
 - E4 (porosidad de la pared perforada)= p
 - E5 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

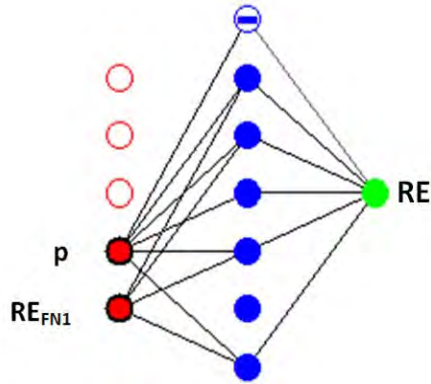


Figura 5.6. Topología de la NN optimizada para modelo ARJ de una cámara

5.3.2.2. Oleaje irregular

Siguiendo una metodología similar, se han obtenido modelos neuronales para oleaje irregular.

El modelo neuronal ARJ de una cámara y oleaje irregular parte de las siguientes características:

- Variables de Entrada (5):
 - E1 (ancho de cámara relativo a la longitud de onda)= $B/L01$
 - E2 (peralte de la ola)= $Hs/L01$
 - E3 (altura de ola relativa a la profundidad)= Hs/h
 - E4 (porosidad de la pared perforada)= p
 - E5 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE
- Número total de ensayos: 124

A partir de estas características y según las propias recomendaciones de la aplicación en función del número de ensayos disponibles y de las variables de entrada y salida existentes, la red tiene la siguiente topología inicial (Fig. 5.7):

- Neuronas en capa oculta: 3 (1 de las cuales es lineal)
- Número de parámetros: 24
- Ensayo para entrenamiento: 98
- Ensayos para validación: 14
- Ensayos para test: 12

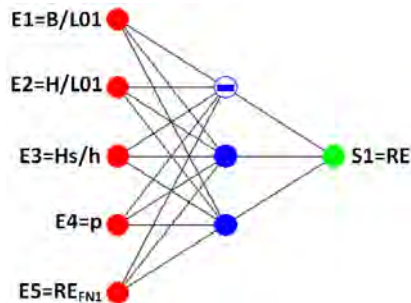


Figura 5.7. Topología inicial de la red para ARJ una cámara y oleaje irregular

Una vez introducidos los datos de entrada y configurada la red, el proceso de optimización da como resultado una nueva red en la que se han reducido el número de conexiones, de neuronas en la capa oculta, de variables de entrada y, en consecuencia, el número de parámetros.

De la selección de redes optimizadas como mejores para cada combinación de variables de entrada que se tienen en cuenta, finalmente, se ha seleccionado la red cuyas variables de entrada son la E4 y E5, que tiene el error

mínimo en la estimación de RE en relación al número de variables de entrada que participan del modelo. La topología final de la red queda definida según las siguientes características (Fig. 5.8):

- Neuronas en capa oculta: 3 (1 de las cuales es lineal)
- Número de parámetros: 15
- Variables de Entrada (2):
 - E4 (porosidad de la pared perforada)= p
 - E5 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

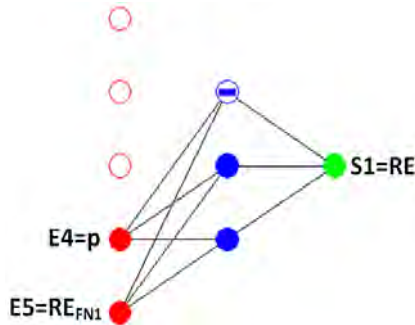


Figura 5.8. Topología de la NN optimizada para modelo ARJ de una cámara

5.3.2.3. Resultados

El ajuste gráfico del resultado del modelo con respecto al resultado experimental para cada índice de porosidad se muestra en la Figura 5.9, para aberturas de la pared tipo ranura y en la Figura 5.10, para aberturas de la pared tipo orificio).

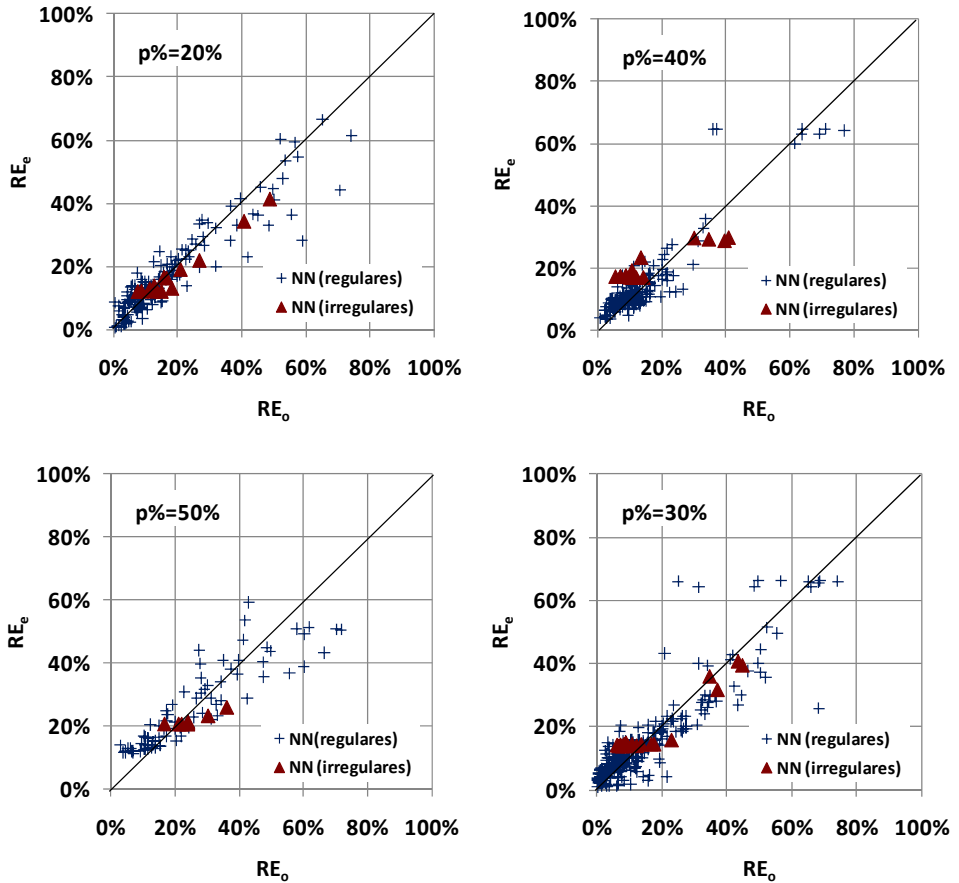


Figura 5.9. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (RE_e) respecto del RE observado (RE_o) para ARJ de una cámara y aberturas tipo ranura

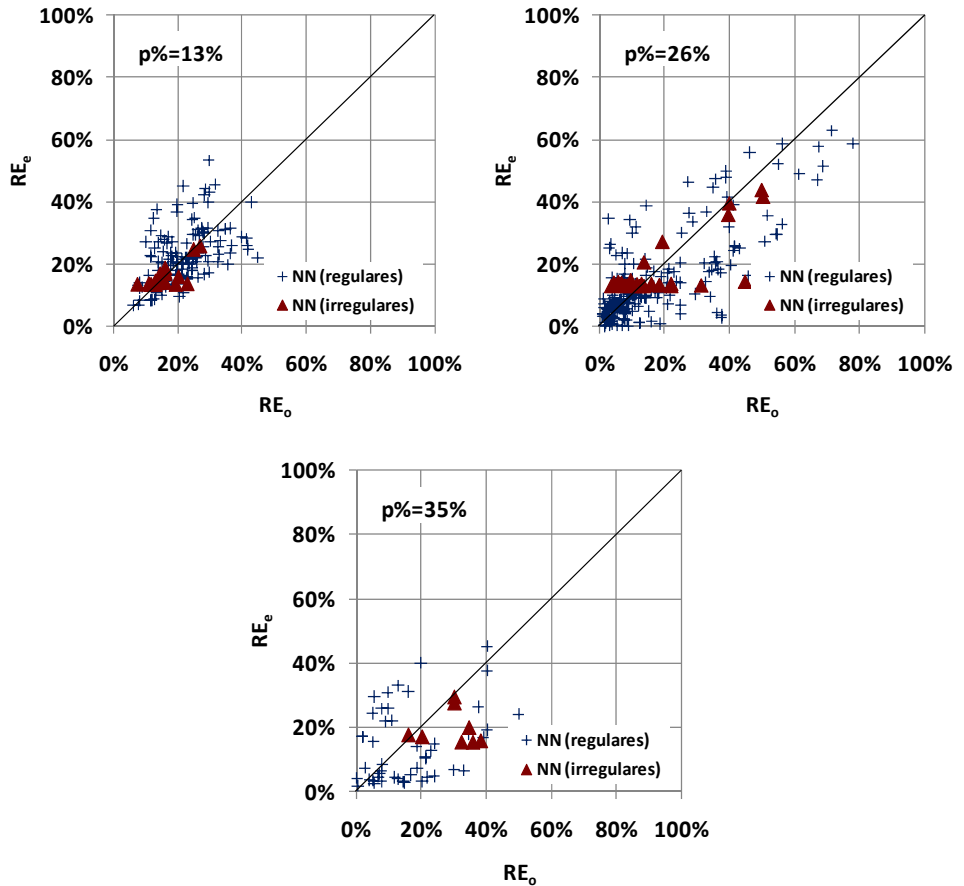


Figura 5.10. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (RE_e) respecto del RE observado (RE_o) para ARJ de una cámara y aberturas tipo orificio

Los errores rMSE en el ajuste de ambos modelos, regular e irregular, para ARJ de una cámara se muestran a continuación (Tabla 5.1).

p%	RE _{NN} (regular)	RE _{NN} (irregular)
13%	10.7%	4.7%
20%	7.2%	8.1%
26%	21.2%	71.1%
30%	11.2%	25.6%
40%	7.7%	9.8%
50%	6.2%	20.6%
Promedio	10.7%	23.3%

Tabla 5.1. Error rMSE de RE estimado con modelo neuronal para oleaje regular, RE_{NN}(regular) y oleaje irregular RE_{NN}(irregular) en ARJ de una cámara

5.3.3. Modelo ARJ de dos cámaras

Las variables estructurales consideradas para ARJ de dos cámaras son B2, B1, y p1, p2 anchos de cámara de la cámara frontal y trasera y porosidades de las paredes perforadas frontal y trasera, respectivamente.

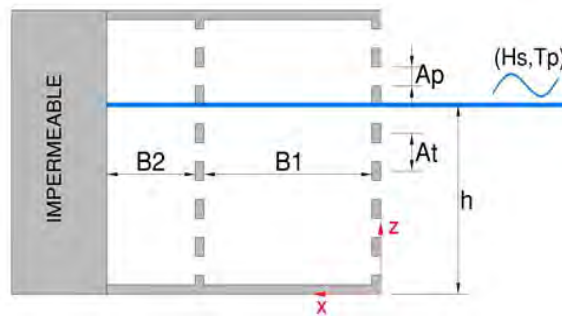


Figura 5.11. Esquema de modelo ARJ de dos cámaras

5.3.3.1. Oleaje regular

Las variables de oleaje consideradas para optimizar el modelo regular son las mismas que en el caso de una cámara: H_i = altura de ola significativa incidente

y L_i = longitud de onda correspondiente al período de onda significativa incidente T_i . Las variables estructurales consideradas para ARJ de dos cámaras son: B_1 , B_2 , y p_1 , p_2 anchos de cámara de la cámara frontal y trasera y porosidades de las paredes perforadas frontal y trasera, respectivamente.

Al igual que en el caso del modelo ARJ de una cámara, para el caso de dos cámaras se han considerado las siguientes variables adimensionalizadas cuyas componentes se describen en el esquema de la Figura 5.7.

Las siguientes variables adimensionales son tomados como entradas de la red para cámara de 2-ARJ: B_1/L , $(B_1+B_2)/L$, $B_1/(B_1+B_2)$, H/L , H/h , p_1 , p_2 , p_1/p_2 .

El modelo neuronal ARJ de dos cámaras y oleaje regular parte de las siguientes características:

- Variables de Entrada (9):

E1 (ancho de primera cámara relativo a la longitud de onda)= B_1/L

E2 (ancho total de cámara relativo a la longitud de onda)= $(B_1+B_2)/L$

E3 (ancho de cámara relativo al ancho total)= $(B_1/(B_1+B_2))$

E4 (peralte de la ola)= H/L

E5 (altura de ola relativa a la profundidad)= H/h

E6 (porosidad de la primera pared perforada)= p_1

E7 (porosidad de la segunda pared perforada)= p_2

E8 (relación entre porosidad de paredes)= p_1/p_2

E9 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}

- Variables de Salida (1):

$S1$ (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

- Número total de ensayos: 600

A partir de estas características y según las propias recomendaciones de la aplicación en función del número de ensayos disponibles y de las variables de entrada y salida existentes, la red tiene la siguiente topología inicial (Fig. 5.12):

- Neuronas en capa oculta: 3
- Número de parámetros: 37
- Ensayo para entrenamiento: 483
- Ensayos para validación: 65
- Ensayos para test: 52

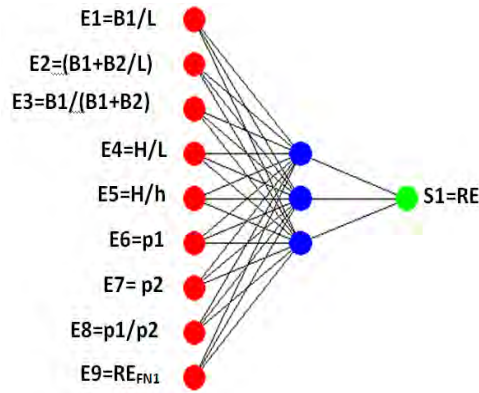


Figura 5.12. Topología inicial de la NN para ARJ dos cámaras y oleaje regular

Del mismo modo que para ARJ de una cámara, una vez introducidos los datos de entrada y configurada la red, el proceso de optimización da como resultado una nueva red en la que se han reducido el número de conexiones, de

neuronas en la capa oculta, de variables de entrada y , en consecuencia, el número de parámetros.

De la selección de redes optimizadas como mejores para cada combinación de variables de entrada que se tienen en cuenta, finalmente, se ha seleccionado la red cuyas variables de entrada son la E6 y E9, que tiene el error mínimo en la estimación de RE en relación al número de variables de entrada que participan del modelo. La topología final de la red queda definida según las siguientes características (Fig. 5.13):

- Neuronas en capa oculta: 2
- Número de parámetros: 11
- Variables de Entrada (2):
 - E6 (porosidad de la pared perforada de la segunda cámara)= $p2$
 - E9 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

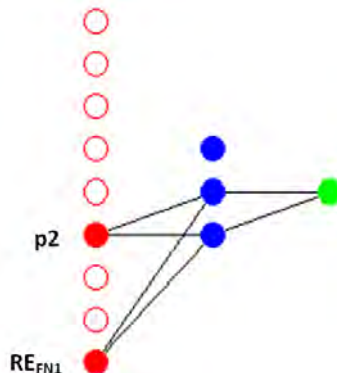


Figura 5.13. Topología de la NN podada para modelo ARJ de dos cámaras (oleaje regular)

Los errores producidos en el ajuste de ambos modelos se muestran en el apartado dedicado a los resultados, al igual que el ajuste gráfico del resultado del modelo con respecto al resultado experimental.

5.3.3.2. Oleaje irregular

El modelo neuronal ARJ de dos cámaras y oleaje irregular parte de las siguientes características:

- Variables de Entrada (9):
 - E1 (ancho de primera cámara relativo a la longitud de onda)= $B1/L01$
 - E2 (ancho total de cámara relativo a la longitud de onda)= $(B1+B2)/L01$
 - E3 (ancho de cámara relativo al ancho total)= $(B1/(B1+B2))$
 - E4 (peralte de la ola)= $Hs/L01$
 - E5 (altura de ola relativa a la profundidad)= Hs/h
 - E6 (porosidad de la primera pared perforada)= $p1$
 - E7 (porosidad de la segunda pared perforada)= $p2$
 - E8 (relación entre porosidad de paredes)= $p1/p2$
 - E9 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1)
= RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE
- Número total de ensayos: 56

A partir de estas características y según las propias recomendaciones de la aplicación en función del número de ensayos disponibles y de las variables de entrada y salida existentes, la red tiene la siguiente topología inicial (Fig. 5.14):

- Neuronas en capa oculta: 2
- Número de parámetros: 25
- Ensayo para entrenamiento: 44
- Ensayos para validación: 6
- Ensayos para test: 6

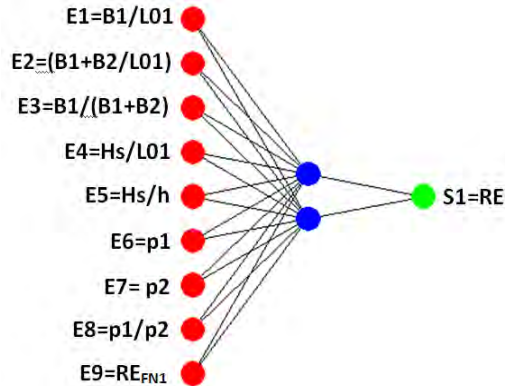


Figura 5.14. Topología inicial de la NN para ARJ dos cámaras (oleaje irregular)

Una vez introducidos los datos de entrada y configurada la red, el proceso de optimización da como resultado una nueva red en la que se han reducido el número de conexiones, de neuronas en la capa oculta, de variables de entrada y, en consecuencia, el número de parámetros.

De la selección de redes optimizadas como mejores para cada combinación de variables de entrada que se tienen en cuenta, finalmente, se ha seleccionado la red cuyas variables de entrada son la E6 y E9, que tiene el error

mínimo en la estimación de RE en relación al número de variables de entrada que participan del modelo. La topología final de la red queda definida según las siguientes características (Fig. 5.15):

- Neuronas en capa oculta: 2
- Número de parámetros: 11
- Variables de Entrada (2):
 - E6 (porosidad de la pared perforada de la segunda cámara)= p_2
 - E9 (energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1) = RE_{FN1}
- Variables de Salida (1):
 - S1 (energía reflejada estimada por el modelo neuronal) = RE

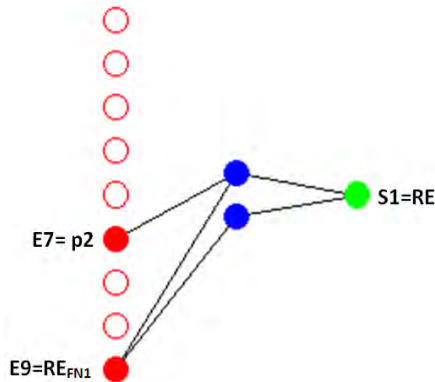


Figura 5.15. Topología de la NN podada para modelo ARJ de dos cámaras (oleaje irregular)

5.3.3.3. Resultados

El ajuste gráfico del resultado del modelo con respecto al resultado experimental se muestra a continuación (Fig. 5.16).

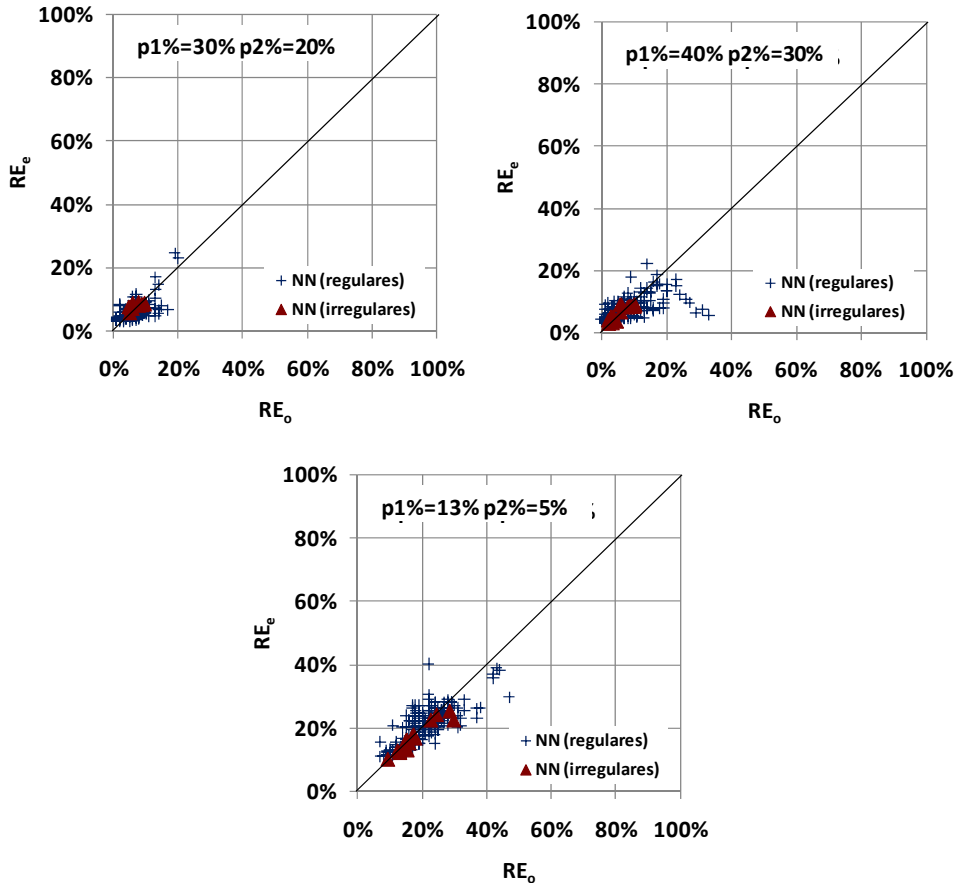


Figura 5.16. Ajuste de RE estimado con el modelo neuronal (RE_e) respecto del RE observado (RE_o) para ARJ de dos cámaras

Los errores producidos en el ajuste de ambos modelos, regular e irregular, para ARJ de dos cámaras se muestran en la Tabla 5.2.

p1%	p2%	$RE_{NN}(\text{regular})$	$RE_{NN}(\text{irregular})$
13%	5%	4.1%	1.4%
30%	20%	16.5%	4.6%
40%	30%	25.1%	0.4%
Promedio		15.2%	2.1%

Tabla 5.2. Error $rMSE$ de RE estimado con modelo neuronal para oleaje regular, $RE_{NN}(\text{regular})$ y oleaje irregular $RE_{NN}(\text{irregular})$ en ARJ de dos cámaras

5.3.4. Consideraciones finales

La funcionalidad que tienen los modelos neuronales que se aplican en este trabajo consiste en servir de herramienta para encontrar la función equivalente a la modelizada por la red. Esta funcionalidad es posible gracias a que se ha conseguido optimizar la red hasta quedarse con sólo dos variables de entrada, una de ellas la estimación de la energía reflejada mediante modelo analítico (RE_{FN1}), y la otra, la porosidad, $p\%$ en el caso de ARJ de una cámara y $p2\%$ en el caso de ARJ de dos cámaras.

Esto hace que las relaciones modelizadas por el modelo neuronal entre las variables de entrada y la salida sean sencillas de ajustar, como se verá en el siguiente apartado.

5.4. Nueva fórmula semiempírica

El objetivo de aplicar técnicas de redes neuronales no es otro que el de obtener por un lado las relaciones no lineales que el modelo analítico no encuentra y, por otro, el de seleccionar aquellas variables de entrada que

determinan dichas relaciones. De manera que, a partir de las múltiples simulaciones realizadas, se pueden extraer de la red expresiones explícitas más sencillas que las que se derivan de los modelos NN.

El haber obtenido que sólo dos variables (RE_{FN1} y la porosidad) sean las que intervienen de forma influyente en el resultado, facilita el proceso para encontrar una expresión sencilla que sustituya a las relaciones más complejas y “oscuras” establecidas por el modelo neuronal.

Ello ha sido posible gracias a, por una parte, aplicar estrategias evolutivas que permitan la simplificación del problema, y por otra, la inclusión como variable de entrada en el modelo neuronal del resultado estimado previamente por el modelo analítico FN1. Lo que demuestra que el objetivo pretendido de que la NN encuentre aquellas relaciones no lineales que el modelo analítico no alcanza a considerar ha sido cumplido.

Para ello, se han simulado tantos casos como son necesarios para tener una representatividad suficiente de las estimaciones de RE en el rango de validez de cada variable y de cada modelo neuronal.

Los modelos NN a partir de los cuales se realizan las simulaciones son diferentes para el caso de una cámara y de dos cámaras (ver Fig. 5.6 y Fig. 5.13, respectivamente). Ambos son resultado de modelizar los resultados experimentales con oleaje regular, los cuales han dado resultados más fiables como se ha visto en el apartado anterior.

5.4.1. Simulaciones para ajuste de modelo ARJ de una cámara

Las simulaciones realizadas están comprendidas dentro del rango de las variables que se muestran en la Tabla 5.3.

	B/L	H/L	H/h	p%
ARJ de una cámara	1/20-1/2	1/150-1/10	1/15-1/3	13%-50%

Tabla 5.3. Rango de las variables en simulaciones de los modelos NN para ARJ de una cámara

Las variables seleccionadas por el modelo neuronal para el caso de ARJ de una cámara han sido RE_{FN1} y p%. Para obtener estimaciones sintéticas de RE a partir del modelo NN se ha mantenido fijo el valor de una de las variables de entrada seleccionadas por el modelo neuronal y variado la otra en su rango de validez.

La siguiente figura muestra el resultado de las simulaciones realizadas para diferentes porosidades y en los rangos de las variables descritos en la tabla anterior, en las que se relacionan el valor de RE estimado por FN1 y el valor de RE estimado por la NN para modelo ARJ de una cámara (Fig. 5.17).

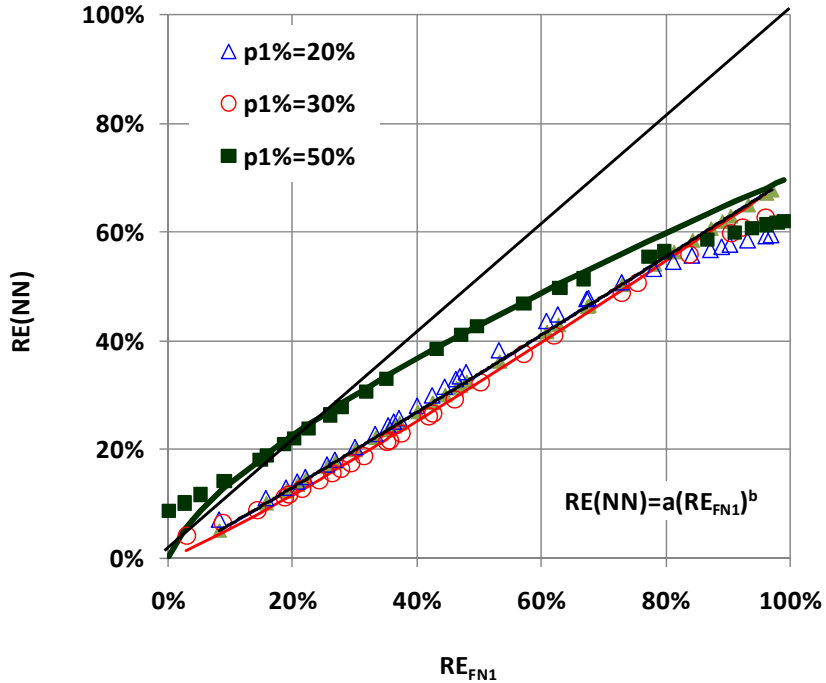


Figura 5.17. $RE(NN)$ en relación a RE_{FN1} para diferentes porosidades en ARJ de una cámara.

La relación encontrada entre ambos parámetros que más minimiza el error, $rMSE$, entre el resultado de la red y el experimental es la que relaciona la estimación de RE obtenida del modelo FN1, RE_{FN1} , y la estimación de RE obtenida por la NN, $RE(NN)$, según una función potencial con dos parámetros:

$$a = 0.7$$

b = una función cuadrática dependiente de la porosidad, $p=p\%/100$, de la pared frontal perforada, cuya expresión es [5.3].

$$b = -12p^2 + 6,7p + 0,2 \quad [5.3]$$

5.4.2. Simulaciones para ajuste de modelo ARJ de dos cámaras

Las simulaciones realizadas están comprendidas dentro del rango de las variables que se muestran en la Tabla 5.4.

	B/L	H/L	H/h	p1%	p2%
ARJ de dos cámaras	1/10-1	3/1000-1/10	1/250-1/2	13%-35%	5%-30%

Tabla 5.4. Rango de las variables en simulaciones de los modelos NN para ARJ de dos cámaras

Las variables seleccionadas por el modelo neuronal para el caso de ARJ de dos cámaras han sido RE_{FN1} y p2%. Al igual que en el caso de ARJ de una cámara, para obtener estimaciones sintéticas de RE a partir del modelo NN para dos cámaras, se ha mantenido fijo el valor de una de las variables de entrada y variado la otra en su rango de validez.

La siguiente figura muestra el resultado de las simulaciones realizadas para diferentes porosidades y en los rangos de las variables descritos en la tabla anterior, en las que se relacionan el valor de RE estimado por FN1 y el valor de RE estimado por la NN para modelo ARJ de dos cámaras (Fig. 5.18).

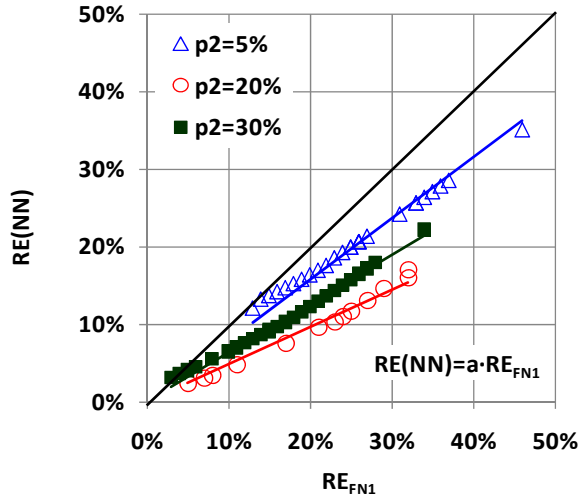


Figura 5.18. $RE(NN)$ en relación a RE_{FN1} para diferentes porosidades ($p_2\%$) en ARJ de dos cámaras.

La relación encontrada entre ambos parámetros, para el caso de ARJ de dos cámaras, es una función lineal de coeficiente variable con la porosidad de la pared de la cámara posterior.

Minimizando el error, $rMSE$, entre el resultado de la red y el experimental, se obtiene la expresión del coeficiente variable del que depende la relación entre la energía reflejada estimada por el modelo analítico modificado, RE_{FN1} , y la estimada por el modelo neuronal, $RE(NN)$.

Así pues, para ARJ de dos cámaras y oleaje regular, la $RE(NN)$ es proporcional a RE_{FN1} según la expresión [5.4].

$$a = -12p_2^2 + -5p_2 + 1 \quad [5.4]$$

Donde $p_2 = p_2\%/100$ es la porosidad de la pared perforada trasera.

5.4.3. Modelo FN1 modificado

A partir de las expresiones anteriores, el modelo FN1 es modificado dando lugar a una nueva fórmula de estimación de la energía reflejada para oleaje regular en estructuras marítimas ARJ de una cámara [5.5] y de dos cámaras [5.6]:

$$RE(\text{regular}) = 0,7 \cdot (RE_{FN1})^{-12p^2+6,7p+0,2} \quad [5.5]$$

$$RE(\text{regular}) = (-12p_2^2 + -5p_2 + 1) \cdot RE_{FN1} \quad [5.6]$$

Donde RE_{FN1} es la energía reflejada estimada por el modelo analítico FN1, $p=p\%/100$ es la porosidad de la pared frontal en ARJ de una cámara y $p_2=p_2\%/100$ es la porosidad de la pared posterior perforada en ARJ de dos cámaras.

Los resultados del error para la estimación de $RE(\text{regular})$ mediante las fórmulas [5.5], para el caso de una cámara, y [5.6], para el caso de dos cámaras, se muestran en la Tabla 5.5 y Tabla 5.6, respectivamente.

p%	RE_{NN}	$RE(\text{regular})$ [5.5]
13%	10.7%	12.7%
20%	7.2%	7.2%
26%	21.2%	21.6%
30%	11.2%	12.2%
40%	7.7%	8.9%
50%	6.2%	7.3%
Promedio	10.7%	11.6%

Tabla 5.5. Error rMSE para oleaje regular en estructura marítima ARJ de una cámara del modelo neuronal, RE_{NN} y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{regular})$.

p1%	p2%	RE_{NN}	$RE(\text{regular})$ [5.6]
13%	5%	4.1%	9.6%
30%	20%	16.5%	15.8%
40%	30%	25.1%	55.7%
Promedio		15.2%	27.0%

Tabla 5.6. Error $rMSE$ para oleaje regular en estructura marítima ARJ de dos cámaras del modelo neuronal, RE_{NN} , y la fórmula semiempírica, $RE(\text{regular})$.

A partir de los modelos neuronales con oleaje regular se han obtenido las relaciones existentes entre el resultado con oleaje regular e irregular. De modo que se ha encontrado que la energía reflejada según los experimentos para el caso de oleaje irregular es un 90% de la energía reflejada estimada con la fórmula obtenida del caso de oleaje regular (Fig. 5.19), tanto para ARJ de una cámara como para ARJ de dos cámaras [5.7].

$$RE(\text{irregular}) = 0,9RE(\text{regular}) \quad [5.7]$$

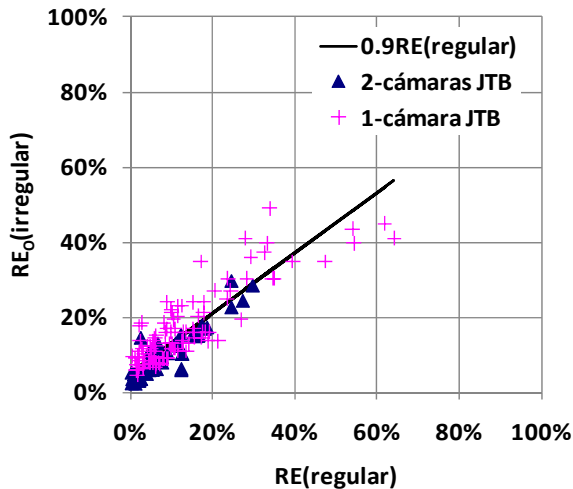


Figura 5.19. $RE(\text{regular})$ en relación a $REo(\text{irregular})$

Donde $REo(\text{irregular})$ es la energía reflejada en los experimentos con oleaje irregular y $RE(\text{regular})$ es la energía reflejada estimada por la fórmula para oleaje regular, con parámetros de entrada los correspondientes al oleaje irregular (H_{m0} , L_{01}).

Los resultados del error para la estimación de $RE(\text{irregular})$ mediante la fórmula [5.7] con el modelo neuronal para oleaje irregular, ambos respecto de RE observado, para los casos de ARJ de una cámara y dos cámaras se muestran en la Tabla 5.7 y Tabla 5.8, respectivamente.

p%	RE_{NN}	$RE(\text{irregular})$ [5.7] con [5.5]
13%	4.7%	7.6%
20%	8.1%	15.9%
26%	71.1%	25.1%
30%	25.6%	34.8%
40%	9.8%	12.2%
50%	20.6%	18.7%
Promedio	23.3%	19.1%

Tabla 5.7. Error $rMSE$ para oleaje irregular en estructura marítima ARJ de una cámara del modelo neuronal, RE_{NN} , y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{irregular})$

p1%	p2%	RE_{NN}	$RE(\text{irregular})$ [5.7] con [5.6]
13%	5%	1.4%	1.9%
30%	20%	4.6%	17.5%
40%	30%	0.4%	1.3%
Promedio		2.1%	6.9%

Tabla 5.8. Error $rMSE$ para oleaje irregular en estructura marítima ARJ de dos cámaras del modelo neuronal, RE_{NN} , y de la fórmula semiempírica, $RE(\text{irregular})$

Los errores de la fórmula son algo superiores a los del modelo neuronal en el caso de ARJ de dos cámaras, pero algo mejores en el caso de ARJ de una

cámara. En todo caso, el resultado final es un modelo semiempírico robusto con error máximo RE inferior al 35% para cualquier porosidad en el rango 13% p <50% en ARJ de una cámara y 13% p 1%<40% y 5%< p 2%<30% en ARJ de dos cámaras. La nueva fórmula semiempírica definida ha resultado ser casi tan buena como la modelación neuronal y muy superior a las formulaciones FN0 y W0.

5.5. Comparación con otros autores

Para examinar la efectividad de las fórmulas obtenidas en esta Tesis Doctoral, en comparación con los modelos propuestos por otros autores, se han ajustado las mismas en términos de coeficiente de reflexión (CR) para comparar las estimaciones resultantes con las estimaciones de CR dadas por los modelos de Zhu and Zhu (2010) y Fugazza and Natale (1992) en el caso de oleaje regular, y el modelo de Fugazza and Natale (1992) en el caso de oleaje irregular. También se han validado con resultados de ensayos de Kondo (1979), Two and Lin (1991) y Zhu and Chwang (2001) para el caso de oleaje regular, y Sawaragi and Iwata (1979) y Suh et al. (2001) para el caso de oleaje irregular.

5.5.1. Oleaje regular

A continuación, se describen las principales características de los modelos para oleaje regular y se concluye con una tabla resumen de los resultados obtenidos.

Zhu and Zhu (2010) comparó la estimaciones teóricas de su método analítico de impedancia con los resultados experimentales de Two and Lin (1991) y Kondo (1979).

Kondo (1979) llevó a cabo una serie de ensayos con oleaje regular sobre ARJ de una y dos cámaras, con un ancho de cámara $B[m]=0.25$ para estructura ARJ

de un cámara y $B1[m]=B2[m]=0.25$ para estructura ARJ de dos cámaras. La altura de ola ensayada fue $H[cm]=4$ y el periodo variaba entre $5<T[s]<12$. La pared perforada era una lámina de acero de 6mm-de espesor con orificios de 20 mm de diámetro y porosidades de $p\%=20\%$ y $p\%=34\%$.

Two and Lin (1991) también realizó ensayos de oleaje regular sobre estructuras marítimas ARJ de una y dos cámaras. La altura de ola variaba entre $2<H[cm]<4$; los periodos de ola entre $0.85<T[s]<3$ y la profundidad de agua fue de $h[m]=0.5$. El ancho de la cámara era $B[m]=0.44$ para estructura ARJ de un cámara y $B1[m]=B2[m]=0.25$ para estructura ARJ de dos cámaras. La pared perforada estaba compuesta de 4 láminas de acero de 1 mm de espesor cada una con orificios de 6 mm de diámetro y una porosidad $p\%=44\%$.

Zhu and Chwang (2001) realizó ensayos sobre ARJ de una cámara para verificar los resultados de su modelo analítico. La altura de ola ensayada era $H[cm]=3$, los periodos de ola variaban entre $0.7<T[s]<1.0$ y la profundidad de agua fue $h[m]=0.32$. En cuanto a la cámara, su anchura variaba entre $0.024<B[m]<0.484$ y la pared estaba perforada con ranuras dando como resultado una porosidad $p\%=20\%$.

La tabla 5.9 muestra el resultado del error MSE relativo obtenido para el caso de oleaje regular, el rango de las variables, el número de ensayos (N_e), número de cámaras (N_c), así como, el tipo de perforación (PT) -siendo O la pared perforada de orificios y R la pared perforada de ranuras. En la Figura 5.20 se comparan los valores del CR observado respecto del estimado por la presente fórmula para oleaje regular de cada uno de los modelos.

Oleaje Regular	Nc	PT	Ne	B/L	H/L	H/h	p1%	p2%	Modelo (año)- r _{MSE}		
									FNO (1992)	Zhu & Zhu (2010)	Fórmula
Kondo (1979)	1	O	9	1/9-1/2	1/57-1/10	1/25	20%	-	14.1%	23.3%	5.8%
	2	O	18	1/8-1/1.5	1/156-1/29	1/25	20% y 34%	20%	16.4%	-	6.0%
Two and Lin (1991)	1	O	30	1/18-1/3	1/400-1/28	1/25-2/25	44%	-	12.7%	0.6%	4.4%
	2	O	30	1/10-1/1.3	1/400-1/28	1/25-2/25	44%	44%	50.2%	-	5.2%
Zhu and Chwang (2001)	1	R	25	1/65-1/2	1/52-1/26	1/11	20%	-	1.3%	4.8%	1.9%
Tesis	1	O	358	1/20-1/2	1/150-1/10	1/15-1/3	13%-35%	-	14.5%	8.3%	7.8%
	1	R	605				20%-50%	-	10.6%	17.0%	3.7%
	2	O	212	1/10-1	3/1000-1/10	1/250-1/2	13%-35%	5%-26%	21.9%	-	2.4%
	2	R	382				30%-40%	20%-30%	20.6%	-	7.6%

Tabla 5.9. Comparación con diferentes modelos y ensayos (oleaje regular).

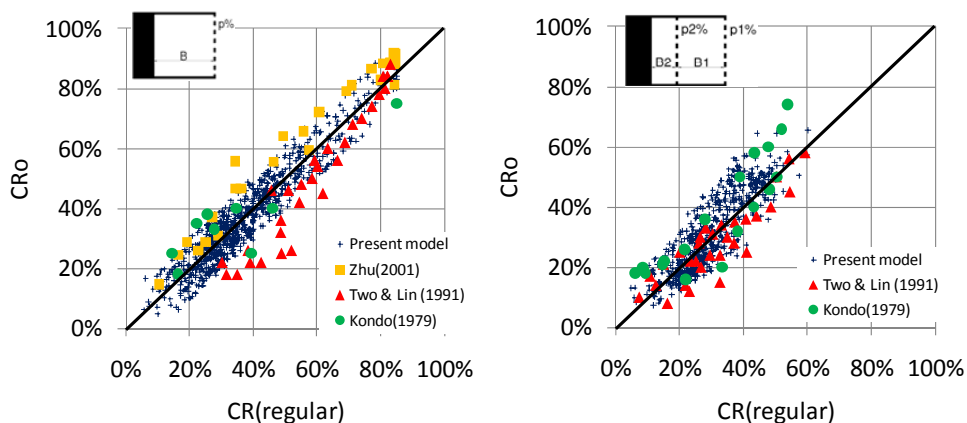


Figura 5.20. Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje regular).

5.5.2. Oleaje irregular

A continuación, se comparan los resultados obtenidos para el caso de oleaje irregular.

Suh et al. (2001) realizó experimentos de oleaje irregular sobre ARJ de una cámara. Ensayó con anchos de cámara $B[m]=0.15, 0.30, 0.45$ and 0.60 y porosidad $p\%=33\%$. Las alturas de ola significativa ensayadas estaban comprendidas entre $3 < H_s[cm] < 10$ y los periodos correspondientes entre $1.0 < T_s[s] < 2.0$. La profundidad de agua fue $h[m]=0.5$ m.

El modelo de Fugazza and Natale (1992) fue validado para el caso de oleaje irregular y ARJ de una cámara con los ensayos de Sawaragi and Iwata (1979). Estos ensayos fueron realizados con anchura de cámara entre $0.10 < B[m] < 0.82$ y porosidad $p\%=50\%$. La altura y periodo de la ola ensayada fue $H[cm]=2$ y $T_s[s]=0.7$, respectivamente, con una profundidad de agua $h[m]=0.25$.

La tabla 5.10 muestra el resultado del error MSE relativo obtenido para el caso de oleaje irregular, el rango de las variables, el número de ensayos, número de cámaras y el tipo de perforación. En la Figura 5.21 se comparan los valores del CR observado respecto del estimado por la presente fórmula para oleaje irregular de cada uno de los modelos.

Oleaje irregular	Nc	PT	Nt	B/L ₀₁	Hs/L ₀₁	Hs/h	p1%	p2%	Modelo(año) - r _{MSE}	
									FN0(1992)	Tesis
Sawaragi & Iwata (1979)	1	PW	8	1/7-1/0.85	1/34-1/34	1/12-1/12	50%	-	18.1%	10.4%
Suh et al. (2001)	1	SW	60	1/3-1/25	1/125-1/25	1/14-1/4	33%	-	9.7%	13.3%
Tesis	1	PW	60	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-	13.8%	5.8%
	1	SW	58	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-	12.4%	3.2%
	2	PW	21	1/7-2/3	1/100-3/50	1/8-1/3	13%-35%	5%-26%	23.6%	1.6%
	2	SW	32				30%-40%	20%-30%	5.1%	1.1%

Tabla 5.10. Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje irregular).

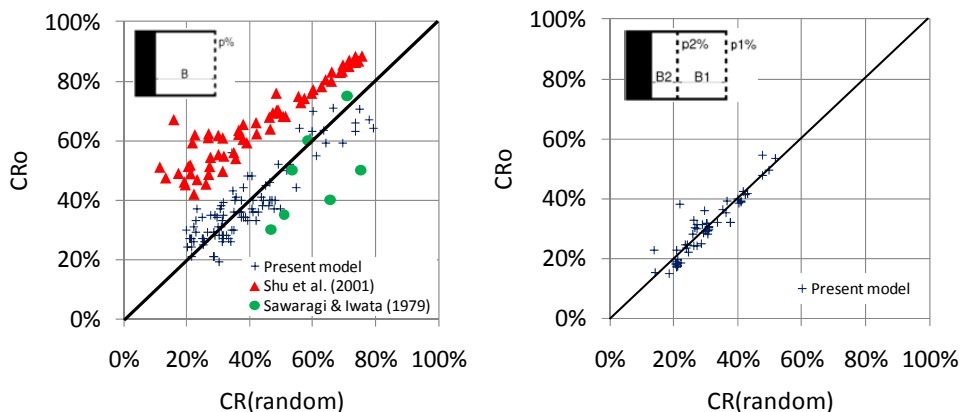


Figura 5.21. Comparación de diferentes modelos y ensayos (oleaje irregular).

Como resumen de la comparación realizada, se puede decir que el presente modelo es mejor que el resto de modelos con los que se ha comparado, tanto para la estimación de los resultados experimentales propios como para los resultados experimentales de otros autores. Sólo el resultado obtenido con el modelo de Suh et al. (2001) para estructuras ARJ de una cámara y oleaje irregular

es algo mejor que el propuesto en esta Tesis Doctoral; sin embargo, se debe tener en cuenta que cada autor ha utilizado un procedimiento diferente de estimación de la reflexión del oleaje y diferentes metodologías experimentales, lo que puede explicar algunas de las diferencias observadas.

5.6. *Resumen del capítulo*

En este capítulo se muestra el resultado de aplicar redes neuronales podadas mediante estrategias evolutivas a la modelización del fenómeno de amortiguamiento de la reflexión en el interior de cámaras ARJ. Mediante esta técnica se han podido encontrar las relaciones no-lineales entre las diferentes variables que influyen al fenómeno de reflexión y, como resultado, se ha obtenido una relación sencilla de formular entre la porosidad y la energía reflejada estimada mediante modelo analítico modificado, FN1.

Las fórmulas que permiten obtener la estimación de la energía reflejada en modelo ARJ de una cámara para oleaje irregular son las expresadas como [5.5] y [5.7], mientras que las fórmulas que permiten obtener la estimación de la energía reflejada en modelo ARJ de dos cámaras para oleaje irregular son las expresadas como [5.6] y [5.7], tal como se muestra en el siguiente cuadro.

$$RE(regular) = 0,7 \cdot (RE_{FN1})^{-12p^2+6,7p+0,2} \quad [5.5]$$

$$RE(regular) = (-12p_2^2 + -5p_2 + 1) \cdot RE_{FN1} \quad [5.6]$$

$$RE(irregular) = 0,9 \cdot RE(regular) \quad [5.7]$$

Las formulaciones expresadas en términos de Coeficiente de Reflexión (CR) tienen las siguientes expresiones para su mejor ajuste:

$$CR(regular) = 0.85(CR_{FN1})^{-12p^2+6.7p+0.2} \quad [5.8]$$

$$CR(regular) = \left(\frac{28}{3} p_2^2 - \frac{11}{3} p_2 + 1\right) \cdot CR_{FN1} \quad [5.9]$$

$$CR(irregular) = 0.8 \cdot CR(regular) + 0.1 \quad [5.10]$$

Ambas formulaciones son válidas para los rangos de las variables que se muestran en la Tabla 5.11, para oleaje regular, y en la Tabla 5.12, para oleaje irregular.

	B/L	H/L	H/h	p1%	p2%
ARJ 1-cámara	1/20-1/2	1/150-1/10	1/15-1/3	13%-50%	-
ARJ 2-cámaras	1/10-1	3/1000-1/10	1/250-1/2	13%-35%	5%-30%

Tabla 5.11. Rango de validez de las variables para oleaje regular

	B/L ₀₁	Hs/L ₀₁	Hs/h	p1%	p2%
ARJ 1-cámara	1/20-1/2	1/100-1/10	1/10-1/3	13%-50%	-
ARJ 2-cámaras	1/7-2/3	1/100-3/50	1/8-1/3	13%-40%	5%-30%

Tabla 5.12. Rango de validez de las variables para oleaje irregular

Finalmente, los resultados de aplicar esta formulación comparada con el resto de modelos y formulaciones empírico-analíticas descritas y desarrolladas en esta Tesis Doctoral, se muestran en las siguientes tablas (Tablas 5.13 a 5.16).

p%	CR _{FN0}	CR _{W0}	CR _{FN1}	CR _{W1}	CR(NN _{FN1})	CR(NN _{W1})	CR(regular)
13%	14.0%	14.2%	5.2%	4.8%	2.9%	3.1%	3.5%
20%	14.3%	14.5%	8.3%	7.8%	3.4%	4.0%	2.8%
26%	16.8%	13.7%	16.5%	14.8%	9.7%	9.4%	10.7%
30%	14.3%	15.2%	14.5%	13.7%	5.5%	5.5%	5.7%
40%	8.2%	8.9%	6.4%	5.7%	3.1%	2.8%	3.3%
50%	4.1%	3.4%	4.7%	4.5%	1.9%	1.9%	2.6%
Media	11.9%	11.7%	9.3%	8.6%	4.4%	4.4%	4.8%

Tabla 5.13. r_{MSE} de CR para ARJ de 1-cámara con oleaje regular

p%	CR _{FNO}	CR _{WO}	CR _{FN1}	CR _{W1}	CR(NN _{FN1})	CR(NN _{W1})	CR(regular)
13%	24.5%	24.8%	1.8%	1.8%	1.3%	1.3%	1.3%
20%	6.7%	6.9%	3.5%	3.6%	0.8%	0.9%	3.1%
26%	8.9%	8.1%	9.0%	8.1%	7.3%	7.2%	7.1%
30%	8.9%	7.0%	8.7%	6.9%	3.4%	3.4%	3.6%
40%	17.2%	13.0%	14.0%	10.5%	7.4%	7.3%	2.8%
50%	19.5%	20.4%	24.5%	25.1%	0.7%	0.8%	3.0%
Media	14.3%	13.4%	10.2%	9.3%	3.5%	3.5%	3.5%

Tabla 5.14. r_{MSE} de CR para ARJ de 1-cámara con oleaje irregular

p1%	p2%	CR _{FNO}	CR _{WO}	CR _{FN1}	CR _{W1}	CR(NN _{FN1})	CR(NN _{W1})	CR(regular)
13%	5%	23.5%	23.3%	4.1%	3.1%	1.0%	1.1%	2.0%
30%	20%	32.8%	50.8%	31.8%	27.1%	5.8%	7.4%	5.6%
40%	30%	14.9%	99.5%	17.7%	30.5%	8.1%	11.8%	8.2%
Media		23.7%	57.9%	17.8%	20.3%	5.0%	6.8%	5.3%

Tabla 5.15. r_{MSE} de CR para ARJ de doble cámara para oleaje regular

p1%	p2%	CR _{FNO}	CR _{WO}	CR _{FN1}	CR _{W1}	CR(NN _{FN1})	CR(NN _{W1})	CR(irregular)
13%	5%	26.0%	24.3%	2.2%	1.8%	0.3%	0.4%	0.3%
30%	20%	5.7%	11.8%	6.0%	12.6%	1.3%	1.5%	1.0%
40%	30%	4.8%	42.6%	5.0%	33.0%	1.4%	7.2%	1.1%
Media		12.1%	26.2%	4.4%	15.8%	0.9%	2.7%	0.8%

Tabla 5.16. r_{MSE} de CR para ARJ de doble cámara para oleaje irregular

CAPÍTULO 6

Conclusiones

Capítulo 6

Conclusiones

Las estructuras marítimas verticales, tanto en diques como en muelles, presentan numerosas ventajas tales como el mejor aprovechamiento del espacio marítimo, el ahorro económico en materiales y la optimización de los plazos de ejecución por el empleo de cajoneros. El inconveniente principal de la solución vertical es la reflexión casi total del oleaje que causa un aumento importante de las condiciones de agitación en el canal de entrada y antepuerto y multirreflexiones en las dársenas. Además, aumentan las alturas de ola máximas, con el consiguiente aumento de las fuerzas sobre la estructura y los caudales de rebase, se agudizan los procesos de socavación y se modifican las condiciones de oleaje sobre tramos de costa adyacentes que, a su vez, ven modificada su forma de equilibrio.

Conseguir la reducción de la energía reflejada en este tipo de estructuras marítimas ha supuesto un reto para la ingeniería marítima desde hace décadas, de forma que son numerosas las tipologías antirreflejantes que han sido desarrolladas basadas en el concepto Jarlan (1961) (ARJ). Sin embargo, el comportamiento hidrodinámico que interviene en el fenómeno de reflexión del oleaje sobre estructuras marítimas ARJ es complejo y su conocimiento es aún

limitado, a pesar de los numerosos modelos empíricos y analíticos que han sido desarrollados, basados fundamentalmente en teoría lineal de ondas.

Un conocimiento más preciso de las relaciones no-lineales existentes entre las diferentes variables climáticas y estructurales de este tipo de estructuras, así como, la influencia que tienen en la estimación de la capacidad de absorción de energía, permiten que el diseño pueda ser más adecuado y ajustado a los requerimientos planteados para cada aplicación práctica.

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se han considerado primero los modelos analíticos existentes de Fugazza y Natale (1992) y Williams et al. (2000), mejorándolos con un nuevo coeficiente de pared perforada (α), dando lugar a los que se han denominado como modelos FN1 y W1, respectivamente. Para ello, se han utilizando los resultados observados en los experimentos físicos realizados en el canal de oleaje del LPC-UPV sobre estructuras de una sola cámara perforada y de doble cámara perforada sometidas a la acción de oleaje regular y de oleaje irregular.

La comparación entre los resultados de ambos modelos modificados empíricamente muestra que el ajuste es mejor con el modelo modificado FN1 que con el modelo modificado W1, aunque aún así no se consigue un buen ajuste respecto de los resultados experimentales (errores cuadráticos medios relativos, $rMSE > 100\%$), debido a que el modelo no tiene en cuenta la componente no lineal del fenómeno de reflexión-disipación de la estructura marítima ARJ.

Por esta razón, en esta Tesis Doctoral se utilizan redes neuronales podadas con estrategias evolutivas para la modelización del fenómeno de la reflexión sobre estructuras marítimas ARJ. Las variables de entrada son los adimensionales B/L (anchura de cámara), H/L (peralte del oleaje), H/h

(profundidad adimensional), porosidad y la reflectividad estimada a partir del modelo FN1. Mediante la simulación de los modelos de redes podadas obtenidos para una cámara y para dos cámaras, se obtienen gráficos de comportamiento en función de las variables y la reflectividad estimada con el modelo FN1, que finalmente permiten proponer una fórmula semiempírica basada en transformaciones no lineales del modelo FN1 y las variables que intervienen en el fenómeno de reflexión.

La modelización neuronal realizada con redes neuronales podadas con estrategias evolutivas ha permitido, por tanto, encontrar relaciones sencillas entre la porosidad, la estimación de energía reflejada del modelo FN1 y los valores de reflectividad observados experimentalmente, tanto para estructuras ARJ de una cámara como de dos cámaras. El nuevo modelo semi-empírico, validado para oleaje regular e irregular, permite obtener estimaciones del porcentaje de la energía reflejada con un error cuadrático medio relativo (rMSE) inferior al 35% para todas las observaciones experimentales utilizadas en la Tesis Doctoral, siendo especialmente preciso (rMSE < 10%) para el caso de estructuras de doble cámara perforada y oleaje irregular, el más común en el diseño de este tipo de estructuras.

Las fórmulas con las que se obtiene la estimación de la energía reflejada (RE) en modelo ARJ de una cámara para oleaje irregular son las expresadas como [5.5] y [5.7], mientras que las fórmulas que permiten obtener la estimación de la energía reflejada en modelo ARJ de dos cámaras para oleaje irregular son las expresadas como [5.6] y [5.7], siendo RE_{FN1} , la estimación de la reflectividad obtenida del modelo FN1, p , la porosidad de la pared frontal en ARJ de una cámara y p_2 , la porosidad de la segunda pared perforada en ARJ de dos cámaras.

$$RE(\text{regular}) = 0,7 \cdot (RE_{FN1})^{-12p^2+6,7p+0,2} \quad [5.5]$$

$$RE(\text{regular}) = (-12p_2^2 + -5p_2 + 1) \cdot RE_{FN1} \quad [5.6]$$

$$RE(\text{irregular}) = 0,9 \cdot RE(\text{regular}) \quad [5.7]$$

La aplicación de técnicas de redes neuronales podadas con estrategias evolutivas ha permitido resolver el problema de encontrar estas relaciones no lineales entre las variables y, además, identificar qué variables de entrada son las que más influyen en el resultado final. La ventaja que proporciona esta metodología, unida a que se parte de que una de las variables de entrada es el propio resultado del modelo analítico modificado, facilitan de forma determinante una formulación sencilla de las relaciones con las que el modelo ha sido capaz de encontrar un buen ajuste a los datos experimentales. La metodología seguida en esta Tesis Doctoral para determinar la estimación semiempírica de reflexiones de estructuras ARJ ha permitido aprovechar buena parte de la potencia de las redes neuronales en la modelación de relaciones no lineales ocultas y, al mismo tiempo, eludir los inconvenientes de la modelación tipo “caja negra” que proporcionan este tipo de técnicas propias de la inteligencia artificial. La estimación semiempírica obtenida, derivada de la modelación neuronal, pertenece ya al campo de la ciencia y la ingeniería convencional y no está sometida a los fuertes riesgos conceptuales de los modelos neuronales.

Futuras líneas de investigación podrían estar enfocadas a aplicar una metodología similar en la estimación de la energía reflejada por estructuras

marítimas antirreflejantes parcialmente perforadas, en las que la profundidad de las cámaras es una variable determinante en la efectividad del diseño; así como, a la estimación de las fuerzas y caudales de rebase sobre este tipo de estructuras influenciadas por la reflexión del oleaje.

Referencias

Referencias

Ansari, N., and Hou, E., 1997. Computational intelligence for optimization. Kluwer, Boston.

Baquerizo, A., Losada, M. A., Smith, J. M., and Kobayashi, N., 1997. Cross-shore variation of wave reflection from beaches. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 123(5), 274–279.

Berenguer, J.M., 2003. Pieza artificial para la construcción de diques, muelles y riberas de baja reflectividad. Patente 2183671. Oficina española de patentes y marcas.

Bergmann, H., Oumeraci, H., 2000. Wave loads on perforated caisson breakwaters. *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1622-1635.

Canel, M., 1994. Dissipative monolithic breakwaters-some aspects of hydrodynamics. *Final Proceedings MCS-Project Vertical Coastal Structures*, 34 p.

Chen, X.F., Li, Y.C., Teng, B., 2007. Numerical and simplified methods for the calculation of the total horizontal wave force on a perforated caisson with a top cover. *Coastal Engineering*, 54, pp. 67–75.

Dhinakaran, G. et al., 2002. “Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves. *Ocean Engineering*, 29, pp.1981-2004.

Esteban, F., Llamas, R., 2007. Estructura de baja reflexión. Patente de invención nº 2262405. Oficina española de patentes y marcas (In Spanish).

Figueres, M., Garrido, J.M. y Medina, J.R. (2003). "Cristalización Simulada para el Análisis del Oleaje Incidente y Reflejado con un Modelo de Onda Stokes-V." VII Jornadas Españolas de Costas y Puertos. Almería, Spain, 2003.

Figueres, M., Medina, J.R. y Van Gent, M. (2005). "Modelización del Rebase en Estructuras Marítimas mediante Redes Neuronales". VIII Jornadas Españolas de Costas y Puertos. Sitges, Spain. Libro de Ponencias.

Franco, L., 1994. Vertical breakwaters: the Italian experience. *Coastal Engineering*, 22, pp. 31-55.

Franco, L., de Gerloni, M., Passoni, G., Zacconi, D., 1998. Wave forces on solid and perforated caisson breakwaters: comparison of field and laboratory measurements. *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1945–1958.

Frigaard, P., and Brorsen, M., 1995. A time-domain method for separating incident and reflected irregular waves. *Coastal Engineering*, 24, 202–215.

Fugazza, M., Natale L., 1992. Hydraulic performance of perforated breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE. 118(1), pp. 1–14.

Hisatoshi, S., Katsu, A., Yasuo, Z., Akihiro, T., Yoshiichi, O., Kiyoharu, S., 1994. Waves-breaking type caisson and breakwater therewith. Patent number JP6002316.

Garrido, J.M., Figueres, M. y Medina, J.R., 2005. Estudio de la reflexión del oleaje en diques verticales AR. Libro de Ponencias de las VIII Jornadas españolas de Costas y Puertos, Sitges 2005.

Garrido, J.M., Medina, J.R., 2006. Study of reflection of perforated vertical breakwaters. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, pp. 4325–4336.

Garrido, J.M., Medina, J.R., 2007. Modelo neuronal para estimar la reflexión del oleaje en diques verticales AR. Libro de Ponencias de las IX Jornadas españolas de Costas y Puertos, AZTI-Tecnalia, pp. 486-495 (in Spanish).

Garrido, J.M., Ponce de León, D., Berruguete, A., Calpe, J.M., Molines, O., Ibarra, V., 2009. Muelle antirreflejantes de tablestacas para la ampliación del Puerto de Cullera. Libro de Ponencias de las X Jornadas españolas de Costas y Puertos, Universidad de Cantabria, pp. 63-72 (In Spanish).

Garrido, J.M., Ponce de León, D., Berruguete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort, L., Yagüe, D., González-Escrivá, J.A., Medina, J.R., 2010. Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caissons. Proceedings of the 32th International Conference on Coastal Engineering, ASCE (in press).

Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. and Medina, J.R., 2008. Block for Anti-Reflectant Quay. WIPO Patent Application WO/2008/062086.

Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. and Medina, J.R., 2008. Anti-Reflectant Breakwater. WIPO Patent Application WO/2008/062087.

Goda, Y., and Suzuki, Y., 1976. 'Estimation of incident and reflected waves. Coastal Engineering, 1976, ASCE, New York, 828–845.

Gomi, P., Rousset, J-M., Ropert, F. et Sergent, P., 2004. Modélisation numérique du comportement hydraulique des caissons Jarlan. PIANC 117, pp. 15-27.

Greslou, L., 1972. Chambre anti reflexion A.R.C. Brevet Sogreah. N.T. 1707.

Hagiwara K., 1984. Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation. Proceedings of the 32th International Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2810–2826.

Honda, H., Shiozaki, S., 2002. Wave-Dissipating Caisson. Patent number JP2002309540.

Huang, Z.H., 2006. A method to study interactions between narrow-banded random waves and multi-chamber perforated structures. Acta Mechanica Sinica, 22 (4), pp. 285–292.

Ijima, T., Tanaka, E., Okuzono, H., 1976. Permeable seawall with reservoir and the use of "Warock". Coastal Engineering 76, pp. 2623-2642.

Ikeno, M., Shimoda, N., Iwata, K., 1988. A new type of breakwater utilizing air compressibility. Proceedings International Conference Coastal Engineering, ASCE, pp. 2326-2339.

Irie, I., Murakami, K., Kataoka, Y., Takehana, N., Hamazaki, Y., Ichikawa, Y., Utsuno, H., 2000. Breakwater Structure. Patent number JP2000319839.

Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N., Cowdell, S., 2000. Wave interactions with perforated breakwater. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE 126 (5), pp. 229–235.

Jarlan, G.E., 1961. A perforated vertical breakwater. The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, n°486, pp. 394-398.

Jarlan, G.E., 1965. The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures. Quart. Bulletin, National Research Council Canada, pp. 23-64.

Jianyi, W., 1992. Experimental study of perforated caisson breakwaters. China Ocean Engineering, Vol. 6, pp. 65-78.

Juhl, J., 1994. Danish experience and recent research on vertical breakwaters. Wave Barriers '94, Yokosuka, Japan.

Kakuno, S., Oda, K., Liu, P.L.-F., 1992. Scattering of water waves by vertical cylinders with a backwall. Proceedings International Conference Coastal Engineering, ASCE, New York, pp. 1258-1271.

Kakuno, S., Tsujimoto, G., Shiozaki, Y., 2003. A design method for double slit-wall breakwaters. Proceedings of Coastal Structures 2003, pp. 295-304.

Kimura, A. (1985). "The decomposition of incident and reflected random wave envelopes." Coastal Engineering in Japan, 28, 59–69.

Kirca, V.O., Kabdasli, M. S., 2009. Reduction of non-breaking wave loads on caisson type breakwaters using a modified perforated configuration. Ocean Engineering, 36, pp. 1316-1331.

Kitamura, Y. et al. 2001. Experimental study on wave reflection and wave forces of double slits caisson breakwater. ADMS 21, pp. 259-263.

Kondo, H., 1979. Analysis of breakwaters having two porous walls. Proceedings of Coastal Structures 1979. pp. 962-977.

Kriebel, D.L., 1992. Vertical wave barriers: wave transmission and wave forces. Proceedings International Conference on Coastal Engineering, ASCE, vol.23, pp.1313-1326.

Kunieda, T., 1983. Breakwater Structure. Patent number JP62055309.

Li, Y.C., Dong, G.H., Liu, H.J., Sun, D.P., 2003. The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated walls. Coastal Engineering, 50, pp. 47–60.

Liberatore, L., 1974. Experimental investigation on wave-induced forces on Jarlan-type perforated breakwaters. *Atti. del XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Napoli, Italy, pp. 101-109.

Liu, Y., Li, Y.C., Teng, B., 2007. The reflection of oblique waves by an infinite number of partially perforated caissons. *Ocean Engineering*, 34, pp. 1965–1976.

Liu, Y., Li, Y., Teng, B., Jiang, J., Ma, B., 2008. Total horizontal and vertical forces of irregular waves on partially perforated caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 55, pp. 537–552.

Losada, I.J., Losada, M.A., Baquerizo, A., 1993. An analytical method to evaluate the efficiency of porous screens as wave dampers. *Applied Ocean Research*, 15, pp. 207–215.

Mansard, E. P. D., and Funke, E. R., 1981. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering 1980*, ASCE, New York, 154–172.

Mansard, E. P. D., and Funke, E. R., 1987. Wave measurement and analysis in laboratory flumes. *Proceeding of IAHR Seminar on Wave Analysis and Generation in Lab. Basins—XXII IAHR Congress*, NRC of Canada, 75–152.

Marimoto, T., 1983. Separating and combining type breakwater revetment. Patent number JP8000508.

Mase, H., Sakamoto, M. and Sakai, T., 1995. Neural network for stability analysis of rubblemound breakwaters. *J. Wtrwy, Port, Coast., and Oc. Engng.*, 121(6), 294-299.

Marks, W., Jarlan, G.E., 1968. Experimental studies on fixed perforated breakwater. *Coastal Engineering*, 68, pp. 1121-1140.

Medina, J.R., 2001. Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 127, pp. 213-221.

Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M., De Rouck, J., 2002. Overtopping analysis using neural networks. *Proceeding of the 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2165-2177.

Medina, J.R., 2003. *Manual de Usuarios del Programa NEUROPORT*. Puertos del Estado.

Medina, J.R., Garrido, J.M. and González-Escrivá, J.A., 2008. Anti-Reflecting Modular Element. WIPO Patent Application O/2008/059083.

Medina, J.R., González-Escrivá, J. A., Fort, L., Martínez, S., Dolores, C., Ponce de León, D., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M. y Berruguete, A., 2009. Estructura Marítima Vertical con Cámaras de Unidades Múltiples para la Atenuación de la Reflexión de Oleaje. Nº de patente ES200931049.

Mei, C.C., 1983. *The applied dynamics of ocean surface waves*. Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 1.

Moody, J.E., 1992. The effective number of parameters: An analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems. In J.E. Moody, S.J. Hanson and R.P. Lippmann (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, pp. 847-854. Morgan Kaufmann, San Mateo, California.

Negro, V., Varela, O., Alonso, E., 1999. Technological innovations in the conceptual design of vertical breakwaters. *Proceeding of Coastal Structures and Breakwaters 99*, ASCE, pp. 505-514.

Ojima, R., Owaki, T., Yamagata, N., Komoto, Y., 1994. Field sliding test of double cylinder caisson breakwater. *Proceedings International Conference on*

HydroTechnical Engineering for Port and Harbor Construction (Hydro-Port), pp. 691-706.

Onishi, H., Nagai, S., 1979. Breakwaters and sea-walls with a slitted box-type wave absorbers. Proceedings Conference on Coastal Structures and Breakwaters, ICE, pp. 9-47.

Oumeraci, H., Kortenhaus, A. 1999. Probabilistic design tool for Vertical Breakwaters. Final Report, PROVERBS-Proyect. First ed. University of Braunschweig, Germany.

Polimón, J., 2002. Dique rompeolas. Nº Patente ES 2232248. Oficina española de Patentes y Marcas.

Sankarbabu, K., Sannasiraj, S.A., Sundar, V. 2008. Hydrodynamic performance of a dual cylindrical caisson breakwater. Coastal Engineering 55, pp. 431–446.

Sawaragi, T., Iwata, K., 1979. Irregular wave attenuation due to a vertical breakwater with air chamber. Proceedings of Coastal Structures 1979. pp. 29-47.

Sekiguchi, S., Miyabe, S., Yamamoto, Y., Miwa, T., 2001. Development of sloping slit caisson breakwater, ADMS 21, pp. 237-242.

Shimatani, M., Ukai, A., Sekimoto, T., Ino, H., 2002. Wave Dissipating Caisson and Wave Dissipating Structure. Patent number JP2002275855.

Shiraishi, N., Palmer, R.Q., Okamoto, H., 1976. Quay wall with wave absorber Igloo. Proceeding of International Conference on Coastal Engineering 76, ASCE, pp. 2677-2696.

Soulié, F.F., Gallinari, P., 1998. Industrial Applications of Neural Networks. World Scientific.

Suh, K.D., Park, W.S., 1995. Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering*, 26, pp. 177–193.

Suh, K.D., Choi, J.C., Kim, B.H., Park, W.S., Lee, K.S., 2001. Reflection of irregular waves from perforated wall caisson breakwaters. *Coastal Engineering* 44, 141–151.

Suh, K.D., Park, J.K., Park, W.S., 2006. Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater. *Ocean Engineering*, 33(2), pp. 264-280.

Tabet-Aoul, E., Lambert, E., 2003. Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 129, pp. 34-40.

Takahashi, S., 2006. Design of vertical breakwaters. Reference Document N34, Port and Harbour Research Institute, Japan.

Takahashi, S., Kotake, Y., Fujiwara, R., Isobe, M., 2002. Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations. *Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 1365-1376.

Tanimoto, K., 1979. Breakwater and Wave Damping Caisson of Shore Protection. Patent number JP54162828.

Tanimoto, K., Yoshimoto, Y., 1982. Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 21(3), pp. 44–77 (in Japanese).

Tanimoto, K., Goda, Y., 1992. Historical development of breakwater structures in the world. *Proceeding of Coastal Structures and Breakwaters* 91, ASCE.

Teng, B., Zhang, X.T., Ning, D.Z., 2004. Interaction of oblique waves with infinite number of perforated caissons. *Ocean Engineering*, 31, pp. 615–632.

Terrett, F.L., Osorio, J.D.C., Lean, G.H., 1968. Model studies of a perforated breakwater. *Coastal Engineering*, pp. 1104-1121.

Twu, S.W., Lin, D.T., 1991. On a highly effective wave absorber. *Coastal Engineering*, 15, pp. 389–405.

Williams, A.N., Mansour, A-E. M., Lee, H.S., 2000. Simplified analytical solutions for wave interaction with absorbing-type caisson breakwaters. *Ocean Engineering*, 27, pp. 1231-1248.

Van Gent, M.R.A. and Van den Boogaard H.F.P., 1998. Neural network and numerical modelling of forces on vertical structures. *Proceedings of the 26th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, pp. 2096-2109.

Yanagimoto, Y., 1998. Wave dissipating cell structure. Patent number JP10168851.

Yip, T.L., Chwang, A.T., 2000. Perforated wall breakwater with internal horizontal plate. *Journal of Engineering Mechanics*. 126 (5), pp. 533–538.

Zelt, J. A., and Skjelbreia, J. E., 1993. 'Estimating incident and reflected wave fields using arbitrary number of wave gauges. *Coastal Engineering 1992*, ASCE, New York, 777–789.

Zhu, S., 1999. Separation of regular waves by a transfer function method. *Ocean Eng.* 26, 1435–1446.

Zhu, S.T., Chwang, A.T., 2001. Investigations on the reflection behaviour of a slotted seawall. *Coastal Engineering*, 43, pp. 93–104.

Zhu, D., Zhu, S., 2010. Impedance analysis of hydrodynamic behaviors for a perforated-wall caisson breakwater under regular wave orthogonal attack. *Coastal Engineering* 57, pp. 722–731.

Anexo A. CR estimado mediante el modelo FN0

El coeficiente de reflexión estimado mediante el modelo de FNO para ARJ de una cámara, después de resolver el problema de onda linealizado por Fuggazza and Natale (1992), es:

$$CR = \frac{\sqrt{(C^2 + W^2)^2 + W^2 R^2 (W^2 R^2 + 2C^2 - 2W^2)}}{C^2 + W^2(1 + R)^2} \quad [\text{A.1}]$$

donde:

$$R = \beta \left(\frac{k}{\omega} \right) \quad [\text{A.2}]$$

$$W = \tan(kB) \quad [\text{A.3}]$$

$$C = 1 - QW \quad [\text{A.4}]$$

$$Q = lk \quad [\text{A.5}]$$

siendo:

$k=2\pi/L$ el número de onda; $\omega=2\pi/T$ es la frecuencia angular, y $B=$ ancho de cámara.

l longitud del chorro de fluido que atraviesa la pared perforada, que se puede considerar igual a la espesor de la pared perforada.

La función β depende del coeficiente α , el cual a su vez depende del coeficiente empírico de descarga C_c y de la geometría de la pared perforada.

$$\beta = \frac{8\alpha}{9\pi} \cdot H \cdot \omega \cdot \frac{W}{\sqrt{W^2(R+1)^2 + C^2}} \cdot \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \quad [\text{A.6}]$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{pC_c} \right)^2 - 1 \quad [\text{A.7}]$$

donde:

H=altura de ola; h=profundidad de agua; p=porosidad, y $C_c=0.55$.

En el caso de ARJ de doble cámara perforada, se obtiene un sistema de ecuaciones de $4 \times 2 + 2$ ecuaciones lineales con las incógnitas: $a_0, b_0, c_0, d_0, a_1, b_1, c_1, d_1, a_2, b_2, c_2,$ and d_2 :

$$a_0 = \frac{H \cdot g}{2\omega \cosh(kh)} \quad [\text{A.8}]$$

$$b_0 = 0 \quad [\text{A.9}]$$

donde g es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2).

De las condiciones de contorno en la primera (subíndice 0) y segunda (subíndice 1) pared perforada, se derivan las siguientes 2×2 ecuaciones:

$$W_0 a_0 + b_0 + W_0 c_0 + d_0 = W_0 a_1 + b_1 + W_0 c_1 + d_1 \quad [\text{A.10}]$$

$$a_0 - W_0 b_0 - c_0 + W_0 d_0 = a_1 - W_0 b_1 - c_1 + W_0 d_1 \quad [\text{A.11}]$$

$$W_1 a_1 + b_1 + W_1 c_1 + d_1 = W_1 a_2 + b_2 + W_1 c_2 + d_2 \quad [\text{A.12}]$$

$$a_1 - W_1 b_1 - c_1 + W_1 d_1 = a_2 - W_1 b_2 - c_2 + W_1 d_2 \quad [\text{A.13}]$$

De las condiciones de contorno de disipación en la primera y segunda pared perforada, se obtienen las siguientes 2×2 ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 & [P_0 + W_0(1 - R_0)]a_0 + (1 - R_0)b_0 - [P_0 + W_0(1 + R_0)]c_0 - (1 + R_0)d_0 = \\
 & = W_0a_1 + b_1 - W_0c_1 - d_1
 \end{aligned} \tag{A.14}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - R_0)a_0 - [P_0 + W_0(1 - R_0)]b_0 - [P_0 + W_0(1 + R_0)]d_0 + (1 + R_0)c_0 = \\
 & = -W_0b_1 + a_1 - W_0d_1 + c_1
 \end{aligned} \tag{A.15}$$

$$\begin{aligned}
 & [P_1 + W_1(1 - R_1)]a_1 + (1 - R_1)b_1 - [P_1 + W_1(1 + R_1)]c_1 - (1 + R_1)d_1 = \\
 & = W_1a_2 + b_2 - W_1c_2 - d_2
 \end{aligned} \tag{A.16}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - R_1)a_1 - [P_1 + W_1(1 - R_1)]b_1 - [P_1 + W_1(1 + R_1)]d_1 + (1 + R_1)c_1 = \\
 & = -W_1b_2 + a_2 - W_1d_2 + c_2
 \end{aligned} \tag{A.17}$$

Para la condición de no-flujo en la pared impermeable trasera (subíndice 2), se obtienen tras 2 ecuaciones:

$$W_2a_2 + b_2 + W_2c_2 + d_2 = 0 \tag{A.18}$$

$$a_2 - W_2b_2 - c_2 + W_2d_2 = 0 \tag{A.19}$$

Los parámetros adimensionales W_0 , P_0 , R_0 , W_1 , P_1 y R_1 incluyen la distancia B_0 y B_1 , desde el origen a la primera y segunda pared porosa, las longitudes de chorro, l_0 and l_1 , y los coeficientes lineales de disipación β_0 and β_1 de la primera y segunda pared perforada:

$$\beta_0 = \frac{8\alpha_0}{9\pi} \cdot U_0 \sinh(kh) \cdot \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \tag{A.20}$$

$$\beta_1 = \frac{8\alpha_1}{9\pi} \cdot U_1 \sinh(kh) \cdot \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(2kh)} \tag{A.21}$$

donde:

$$U_1 = k \cos(kB_1) \cdot \sqrt{[d_1 + b_1 - W_1(a_1 + c_1)]^2 + [a_1 - c_1 - W_1(b_1 + d_1)]^2} \quad [\text{A.22}]$$

$$U_0 = k \cos(kB_0) \cdot \sqrt{[d_0 + b_0 - W_0(a_0 + c_0)]^2 + [a_0 - c_0 - W_0(b_0 + d_0)]^2} \quad [\text{A.23}]$$

Y el coeficiente de reflexión estimado mediante el modelo FNO para ARJ de doble cámara es:

$$CR = \frac{\sqrt{c_1^2 + d_1^2}}{a_1} \quad [\text{A.24}]$$

Anexo B. CR estimado mediante el modelo W0

Para la estimación del coeficiente de reflexión mediante el modelo W0, se parte de la ecuación de Laplace, ésta se modifica incluyendo el término de amortiguamiento en la región interior de la estructura:

$$D(L,B) = k^2 \gamma \left(\frac{B}{L} \right) \quad [\text{B.1}]$$

de la que γ la constante de amortiguamiento, k es el número de onda, B es el ancho de cámara, y L es la longitud de onda.

El coeficiente de reflexión estimado por el modelo W0 para ARJ de una cámara es:

$$CR = \frac{(kT - 1)\alpha_0 \tan \alpha_0 B + ik(1 - S\alpha_0 \tan \alpha_0 B)}{(kT + 1)\alpha_0 \tan \alpha_0 B + ik(1 - S\alpha_0 \tan \alpha_0 B)} \quad [\text{B.2}]$$

donde:

T representa los efectos inerciales:

$$T = \frac{8H}{9\pi} (p^{-2} Cc^{-2} - 1) \frac{\tan(kB)}{\sqrt{\tan(kB)^2 (Tk + 1)^2 + (1 - Sk \tan(kB))^2}} \frac{5 + \cosh(2kh)}{2kh + \sinh(kh)} \quad [\text{B.4}]$$

siendo:

H =altura de ola; h =profundidad de agua; p =porosidad, y $Cc=0.55$ el coeficiente empírico de descarga.

$$\alpha_0^2 = k^2 \left(1 + i\gamma \frac{B}{L} \right) \quad [\text{B.5}]$$

S representa la resistencia al obstáculo, el cual es usualmente representado como el espesor de la pared perforada, l :

$$S = l \quad [\text{B.6}]$$

Y el coeficiente de reflexión estimado por el modelo W0 para ARJ de dos cámaras es:

$$CR = \frac{1 + i[k(S + iT_1) - E]}{-1 + i[k(S + iT_1) - E]} \quad [B.3]$$

$$E = \frac{k(G - \tan(\varepsilon_0 B_1))}{\varepsilon_0(G \tan(\varepsilon_0 B_1) - 1)} \quad [B.7]$$

y

$$G = \frac{\varepsilon_0 - \beta_0 \varepsilon_0 (S_2 + iT_2) \tan(\beta_0 B_2)}{\beta_0 \tan(\beta_0 B_2)} \quad [B.8]$$

en la que β_0 y ε_0 satisface:

$$\beta_0^2 = k^2 \left(1 + i\gamma_2 \frac{B_2}{L}\right) \quad [B.9]$$

$$\varepsilon_0^2 = k^2 \left(1 + i\gamma_1 \frac{B_1}{L}\right) \quad [B.10]$$

donde:

B_1 es el ancho de la primera cámara y, B_2 es el ancho de la segunda cámara.

T_1 y T_2 representan los efectos inerciales, según la expresión [B.4] para la primera y segunda pared perforadas, respectivamente.

Mientras que γ_1 and γ_2 son los coeficiente de amortiguamiento correspondientes a las primera y la segunda pared perforadas, respectivamente.

Anexo C. Referencias del autor

Este Anexo presenta las publicaciones en las que ha participado el autor relacionadas con el objeto de esta Tesis Doctoral.

Se dividen en internacionales, nacionales y patentes.

En congresos internacionales son las siguientes:

Garrido, J.M., Medina, J.R. and González-Escrivá, J.A., 2002. Analysis of wave groups using simulated annealing. Proceeding of the 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE. Cardiff (Reino Unido).....206

Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M., De Rouck, J., 2002. Overtopping analysis using neural networks. Proceeding of the 28th International Conference on Coastal Engineering, ASCE. Cardiff (Reino Unido).....217

Medina, J.R., Garrido, J.M., Gómez-Martín, M.E., Vidal, C., 2003. Armor Damage Analysis using Neural Networks. Proceeding of Coastal Structures 2003, ASCE. Portland (USA).....230

Garrido, J.M., Medina, J.R., 2006. Study of reflection of perforated vertical breakwaters. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, ASCE. San Diego (USA).....243

Garrido, J.M., Ponce de León, D., Berruguete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort, L., Yagüe, D., González-Escrivá, J.A., Medina, J.R., 2010. Study of reflection of new low-reflectivity quay wall caissons. Proceedings of the 32th International Conference on Coastal Engineering, ASCE. Sanghai (China).....255

Martínez, S., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M., Ponce de León, D., and Berruguete, A., González-Escrivá, J. A. y Medina, J.R. (2010). Design a new low-reflectivity quay wall caisson. PIANC MMX Congress. Liverpool (UK)266

En congresos nacionales son las siguientes:

- Figueres, M., Garrido, J.M. y Medina, J.R. (2003). “Cristalización Simulada para el Análisis del Oleaje Incidente y Reflejado con un Modelo de Onda Stokes-V.” VII Jornadas Españolas de Costas y Puertos. Almería 2003.....281
- Garrido, J.M., Figueres, M. y Medina, J.R., 2005. Estudio de la reflexión del oleaje en diques verticales AR. Libro de Ponencias de las VIII Jornadas españolas de Costas y Puertos, Sitges 2005.....290
- Garrido, J.M., Medina, J.R., 2007. Modelo neuronal para estimar la reflexión del oleaje en diques verticales AR. Libro de Ponencias de las IX Jornadas españolas de Costas y Puertos, San Sebastián 2007.....301
- Garrido, J.M., Ponce de León, D., Berruguete, A., Calpe, J.M., Molines, O., Ibarra, V., 2009. Muelle antirreflejantes de tablestacas para la ampliación del Puerto de Cullera. Libro de Ponencias de las X Jornadas españolas de Costas y Puertos, Santander 2009.....315

Además, la investigación en el ámbito de la innovación se ha visto materializada en el desarrollo de nuevas tipologías de estructuras marítimas antirreflejantes con participación directa del autor en las siguientes patentes de invención:

- Elemento modular antirreflejante, patente ES/2006/2299394.....325
- Dique antirreflejante, patente ES/2006/2301402.....336
- Bloque para muelle antirreflejante, patente ES/2006/2301403.....350
- Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje, patente ES/2009/2340460.....363

ANALYSIS OF WAVE GROUPS USING SIMULATED ANNEALING

Joaquín M. Garrido¹, Jose A. Gonzalez-Escrivá² and Josep R. Medina³

Abstract: This paper describes an improvement in the method based on Local Approximation using Simulated Annealing with a Stokes II wave model (LASA-II), reported by Medina (2001) for decomposing incident and reflected wave trains in wave records. The new add-in to the LASA-II consists in a fitted Stokes V wave model upgrading LASA-II to LASA-V. This improvement makes possible its application to non-stationary and highly non-linear wave fields. This time-domain method has been applied to analyze wave grouping characteristics of the incident wave trains corresponding to the tests conducted in the Laboratory of Ports and Coasts (LPC) at the *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV) on a 1:50 scale model of a new breakwater for the Port of Gijón (Spain). The results were compared with a well-accepted 3-point least squares method for separating incident and reflected waves (Baquerizo et al., 1997). Further, pressure gauge records measured on the crown wall were analyzed and compared to the incident wave height obtained by the two methods.

INTRODUCTION

Since the worldwide spread of irregular wave generation techniques for maritime engineering laboratories, it has become evident that special combinations of individual waves in irregular wave trains cause structural responses significantly different than those observed with the corresponding regular waves. The natural tendency of ocean waves to appear in groups and the general agreement that wave grouping characteristics affect the

1 Research Assistant, *Universidad Politécnica de Valencia*, Laboratory of Ports and Coasts, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN. Jgarrido@tra.upv.es

2 Lecturer, *Universidad Politécnica de Valencia*, Laboratory of Ports and Coasts, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN. Jgonzale@upv.es

3 Professor, *Universidad Politécnica de Valencia*, Laboratory of Ports and Coasts, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN. Jrmedina@tra.upv.es

stability and response of certain types of maritime structures have led to the study of wave groups over the last three decades (see Medina and Hudspeth, 1990).

Although it is clear that wave grouping characteristics are relevant in a variety of maritime problems (e.g. surf beat and surf-zone dynamics, resonance, influence of wave grouping on oscillation and positioning of vessels and forces on mooring lines, damage and capsizing of ships, run-up and overtopping, design of marine structures, physical and numerical modeling, design wave uncertainties and rubble mound stability), the ability to incorporate the effects of wave groups has been very limited. Several reasons may be given to explain the collective lack of effectiveness in incorporating wave grouping characteristics into current design methods of maritime structures. The analysis of incident and reflected wave fields both in the laboratory and in field is an unsolved problem which distorts the perception of structural responses. The difficulty lies in the fact that the response of any maritime structure depends on incident waves, but usually it is only possible to measure the incident added to the reflected waves, which is part of the structural response. The error produced in separating incident and reflected waves probably distorts the characteristics of the estimated incident wave groups.

The more popular methods decompose incident and reflected waves in frequency domain include the 2-point method (Goda and Suzuki, 1976), the 3-point method (Mansard and Funke, 1980) and their respective modifications. The limitations of these methods become relevant when the waves to be analyzed are non-linear or non-stationary. Time-domain methods are needed in order to include wave grouping characteristics in current design methods. Some of the methods proposed recently (see Schäffer and Klopman, 2000) are based on sophisticated digital filters and the emulation of wave absorption techniques.

In this paper, the LASA-V method for separating incident and reflected waves is described, and numerical and physical experiments are analyzed and compared with a 3-point based method. The numerical and physical experiments of a new breakwater for the Port of Gijón (Spain) are also described.

ESTIMATION OF INCIDENT AND REFLECTED WAVES USING LASA

The estimation of incident and reflected waves is a critical problem to be faced in a variety of laboratory and field experiments. Some difficulties are associated with the decomposition of incident and reflected waves: time-domain analysis, non-linear and non-stationary waves and noise in wave measurements.

The basic method used by most authors and laboratories is the classic 2-point method. For instance, the 2-point method is used by Ward et al.(1996) and Capitao and Carvalho(1997). Variants of the 2-point method have been proposed, the most popular being the 3-point least squares method by Mansard and Funke (1980). The 3-point least squares method was generalized by Zelt and Skjelbreia (1992) extended to 3D tests by Isaacson (1991) and improved by Baquerizo et al. (1997). A number of authors proposed specific modifications to the 2-point and 3-point methods. For instance, Kimura (1985) proposed a modification of the 2-point method using time windows for non-stationary processes and Medina et al. (1994) used the Kimura's phase-formula to study the properties of the envelope of the incident wave trains.

LASA-II for non-linear and non-stationary waves

Medina (2001) presented a new time-domain method for separating incident and reflected waves in wave flumes using a given number of wave gauges. The method (named LASA-II) is based on a local approximation linear and Stokes II non-linear components as well as a simulated annealing algorithm to calculate the parameters of the local approximation model.

Simulated Annealing, neural networks and genetic algorithms are some of the optimization techniques which have proved to be very effective in solving difficult optimization problems. Simulated Annealing (SA) was derived from the statistical mechanics of particles of liquids and solids, and has proved to be excellent in solving complex combinatorial optimization problems. The idea is to enhance a proximity search by allowing occasional moves in the wrong direction. This prevents the search from becoming trapped in local minimum. Over time the probability of a wrong move is reduced.

The SA algorithm used in this paper to estimate the local approximations is described in seven steps (Medina, 2001): (1) cost function, (2) generation mechanism, (3) initial first solution, (4) initial control parameter, (5) reduction of control parameter, (6) length of Markov chains and (7) stop criterion.

The local approximation model considered in LASA-II is given by the following equations:

$$Z_{lc}(x, t, m\Delta T) = A_0 + A_{11} + A_{12} + A_{21} + A_{22} \quad (1a)$$

$$A_{11} = A_{1_{1m}} \cdot \cos[k_{1m} \cdot x - \omega_{1m} \cdot t + \varepsilon_{1m}] \quad (1b)$$

$$A_{12} = A_{1_{2m}} \cdot \cos[k_{2m} \cdot x - \omega_{2m} \cdot t + \varepsilon_{2m}] \quad (1c)$$

$$A_{21} = A_{2_{1m}} \cdot \cos[2(k_{1m} \cdot x - \omega_{1m} \cdot t + \varepsilon_{1m})] \quad (1d)$$

$$A_{22} = A_{2_{2m}} \cdot \cos[2(k_{2m} \cdot x - \omega_{2m} \cdot t + \varepsilon_{2m})] \quad (1e)$$

$$Z_{rc}(x, t, m\Delta T) = A_0 + A_{13} + A_{14} + A_{23} + A_{24} \quad (2a)$$

$$A_{13} = A_{1_{3m}} \cdot \cos[k_{3m} \cdot x + \omega_{3m} \cdot t + \varepsilon_{3m}] \quad (2b)$$

$$A_{14} = A_{1_{4m}} \cdot \cos[k_{4m} \cdot x + \omega_{4m} \cdot t + \varepsilon_{4m}] \quad (2c)$$

$$A_{23} = A_{2_{3m}} \cdot \cos[2(k_{3m} \cdot x + \omega_{3m} \cdot t + \varepsilon_{3m})] \quad (2d)$$

$$A_{24} = A_{2_{4m}} \cdot \cos[2(k_{4m} \cdot x + \omega_{4m} \cdot t + \varepsilon_{4m})] \quad (2e)$$

in which $Z_{lc}(x, t, m\Delta T)$ and $Z_{rc}(x, t, m\Delta T)$ are the local approximations corresponding to the incident and reflected wave trains considered in the time window defined by the index m ; x = horizontal coordinate in the wave flume direction; t = time ($t \in [(m-1)\Delta\tau, (m+1)\Delta\tau]$); $\Delta\tau$ = half the duration of the time window = time interval of local estimations; T = wave period; L = wave longitude; A_{ij} = wave amplitudes of linear component, A_{2j} = wave amplitudes of nonlinear component ($j = 1, 2, 3, 4$); $k = 2\pi/L$ = wave number; $\omega = 2\pi/T$ = angular frequency. Where ω_m and k_m is related to the linear dispersion formula given by (3).

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kh) \quad (3)$$

Accordingly to Medina (2001), the general characteristics of any Local Approximation (LA) technique are: (1) noise elimination, (2) time window overlapping and (3) local approximation and optimization wave model. LASA-II uses a 50% triangular time window overlapping, linear waves, Stokes II wave model and Simulated Annealing. In Fig. 1, the LASA-II method was compared to the 2-point and Kimura's method and proved to be a robust method (see Medina, 2001). The application of the LASA-II method to physical experiments using non-stationary regular and random waves generated estimations of incident and reflected waves with relative mean squared errors lower than 3% for regular waves and ranging from 4% to 16% for irregular waves depending on the spectral shape.

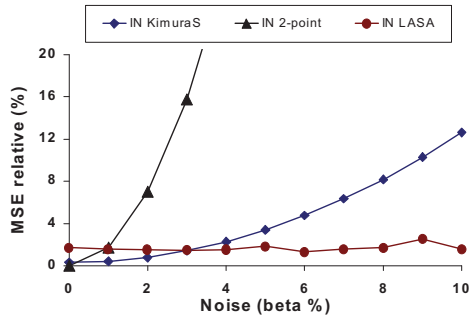


Fig. 1. 2-point, LASA-II, and Kimura's methods applied to linear simulations of narrow band spectrum with noise

LASA-V for highly nonlinear waves

The LASA-V method is an improvement of LASA-II method reached by an approximate Stokes-V wave model with different nonlinearity degrees. Fig. 2 illustrates the curves fitted to Stokes V wave model used in LASA-V.

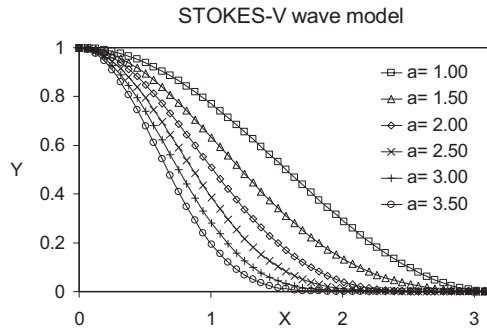


Fig. 2. Stokes-V wave models

Real waves and physical experiment records show highly nonlinear waves, so asymmetric that the Stokes-II model becomes inappropriate. To solve this shortcoming, a LASA-V model is proposed based on a Stokes-V wave model which can reproduce asymmetric amplitudes of crests and troughs with ratios larger than $A_c / A_t > 3$, when A_c is the crest amplitude and A_t is the trough amplitude (see Fig. 3).

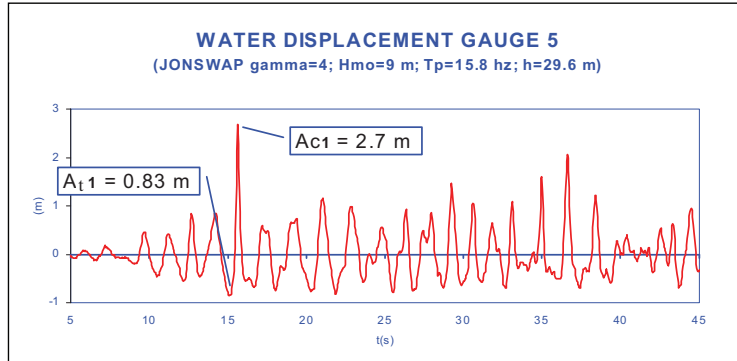


Fig. 3. Typical highly non-linear wave record

WAVE GROUPS IN INCIDENT WAVE TRAIN USING LASA MODELS

Numerical experiments

Noise in measurements is always a problem and may have significant influence on wave grouping. In order to analyze the influence of noise on the wave groupings, numerical experiments have been carried out. The characteristics of these experiments included: irregular waves with different spectral width based on JONSWAP spectrum ($\gamma=1, 4$ y 8), one wave height amplitude and frequency ($H_{mo} = 0.18$ m; $f_p = 0.45$ Hz), one fixed water depth ($h = 0.75$ m), and three levels of noise (0%, 5% and 10 %). The wave grouping characteristics analyzed were: “the length of a run of high waves” (Lh1) and “Length of a total run of waves” (Lh2) proposed by Goda (1970).

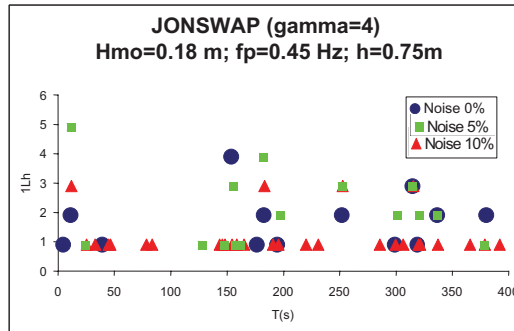


Fig. 4. Noise influence in variation of Lh1

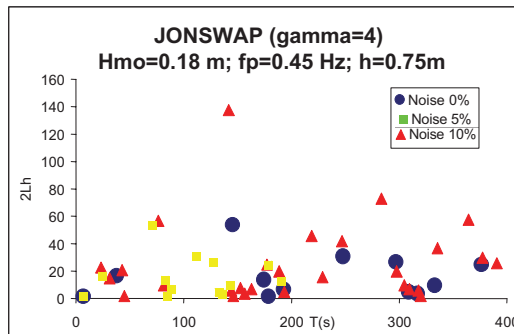


Fig. 5. Noise influence in variation of Lh2

Figs. 4 and 5 show that low levels of noise (5%) may generate a significant distortion of the wave grouping characteristics Lh1 and Lh2. A robust and precise method for separating incident and reflected waves is necessary.

Physical experiments

The higher the non-linearity of waves, the lower the accuracy of the LASA-II method became. Thus, the Stokes-V wave model was incorporated to the LASA method to overcome these shortcomings. Physical model tests on a 1:50 scale model of a new breakwater for the Port of Gijón (Spain) conducted in the LPC-UPV were used to check the capacity of LASA-V to deal with highly non-linear experimental wave records. The characteristics (in prototype values) of the experimental tests were: water depth $25 < h(m) < 29.6$; $2.5 < H_{m0}(m) < 11$; $6.5 < T_p(s) < 15.8$; W (weight of the armour cubes) = 145 Tn; and JONSWAP spectra ($\gamma = 4$ and 8). Fig. 6 shows the position of the wave gauges along the wave flume and Fig. 7 shows the breakwater cross section with the overtopping measuring system.

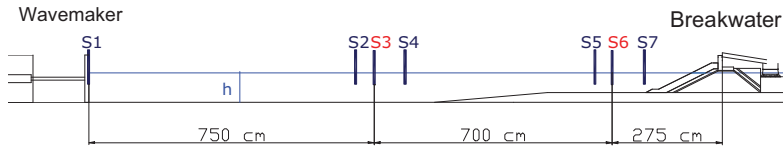


Fig. 6. Distribution diagram of wave gauges in the 2D wave flume of the LPC-UPV

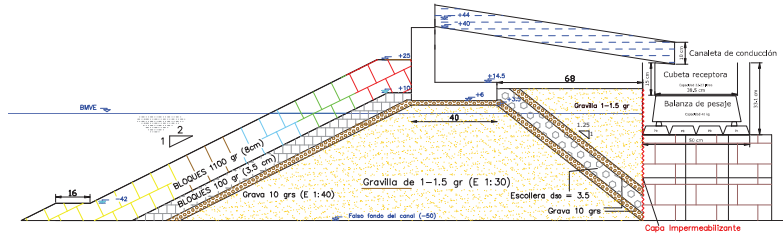


Fig. 7. 1:50 scale cross section of the new Gijón breakwater (Spain)

Five pressure gauges were installed inside the concrete wall for measuring pressures in different positions. Fig. 8 shows a cross section of the crest wall with the pressure gauge positions and the resulting forces.

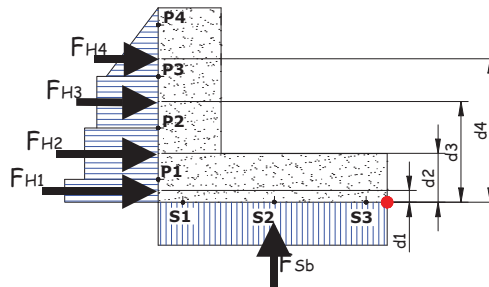


Fig. 8. Cross section of the crest wall with the pressure gauges

The LASA-V method was applied to the measurements taken by probes $\{s_2, s_3 \text{ and } s_4\}$ and probes $\{s_5, s_6 \text{ and } s_7\}$. Fig. 9 shows the comparison between total waves (incident plus reflected) obtained by the LASA-V method and the measured waves in probes $\{s_5, s_6 \text{ and } s_7\}$. The adjustment obtained with the LASA-V method has a relative error of 8 %, although some waves presented strong asymmetries.

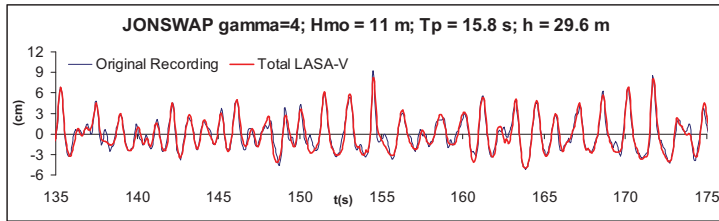


Fig. 9. Total waves estimated (LASA-V) and recorded.

The LASA-V results in terms of the incident and reflected wave records for the aforementioned experiment are compared (see Figs. 10 and 11) to the results of the 3-point least squares method of Baquerizo et al. (1997).

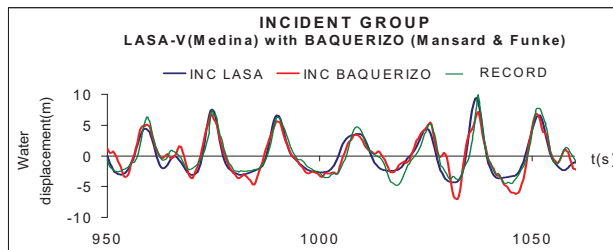


Fig. 10. Baquerizo's method (1997) versus LASA-V method for incident wave

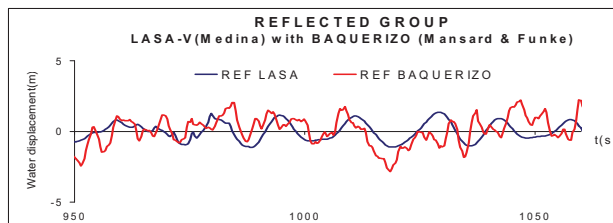


Figure 11. Baquerizo's method (1997) versus LASA-V method for reflected wave

The plots show a good agreement for the incident waves for both methods. The differences in the reflected waves can be summarized by means of the correlation between incident and reflected waves and in terms of the relative error. The analysis of the correlation between incident and reflected waves gives a slight lower correlation for the LASA-V method (4% vs. 9%). The relative error calculated is almost the same (7.9 % for LASA-V versus 8.5% for Baquerizo's method).

Another test consisting in comparing the simultaneousness of the measured horizontal wave forces and the structure to the estimated incident waves (obtained by the LASA-V method) was set up to verify the reliability of the LASA-V method to analyze incident and reflected waves in time-domain. The incident wave results of both LASA-V and Baquerizo's method were used to analyze these in-time coincidences.

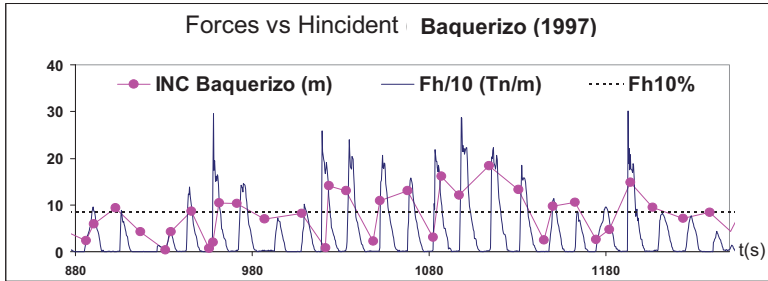


Fig. 12. $F_H/10$ vs H_I for the method of Baquerizo et al. (1997)

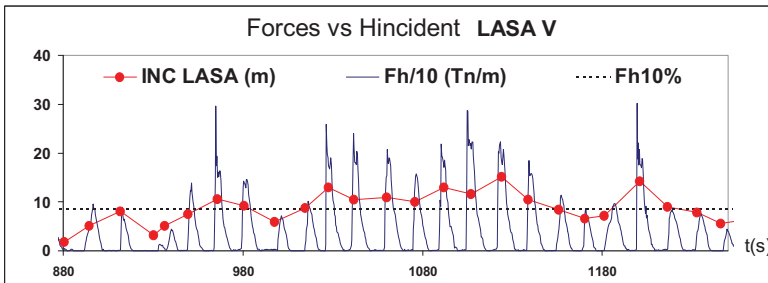


Fig 13. $F_H/10$ vs H_I for LASA-V method

Figs. 12 and 13 show the time analysis of the time-coincidence of wave height with force variations using the results of the LASA-V method and Baquerizo's method, respectively. Analysis of the correlation between wave forces and estimated incident waves with the LASA-V method was found to be 95% versus 85% with Baquerizo's method. Additionally, the dispersion results a slightly lower for the LASA-V method (Fig. 14).

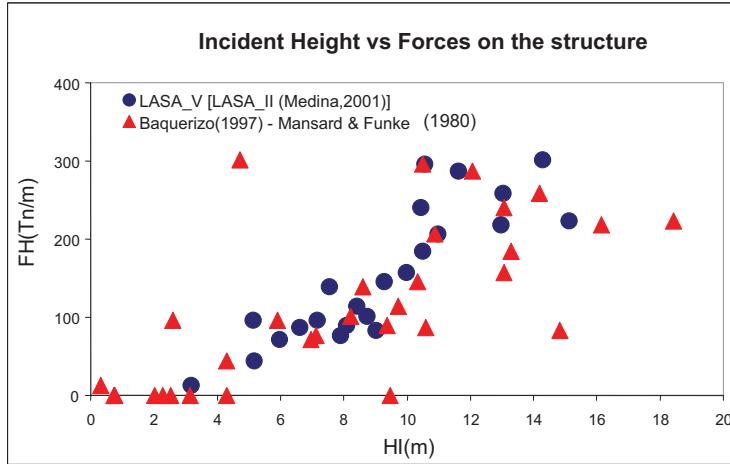


Fig. 14. F_H 10% versus $H_{Incident}$ for the method of Baquerizo et al. (1997) versus LASA-V method

CONCLUSIONS

Most coastal engineering problems are associated with wave groups. Further, several reasons may be given to explain our collective lack of effectiveness in incorporating waves grouping characteristics in the current design methods of maritime structures such as the separating incident and reflected waves (Medina, 2001).

The errors determining incident and reflected waves can affect to wave grouping analysis. In the paper, numerical experiments with noise have been developed and analyzed, showing that low levels of noise (5%) vary significantly the wave grouping characteristics (Lh1 and Lh2). Therefore, a robust and precise method for separating incident and reflected waves is needed to prevent the noise effect on wave group analysis.

A new time-domain method for separating incident and reflected waves based on a Local Approximation and Simulated Annealing with a Stokes II wave model (LASA-II) was presented by Medina (2001) as a consistent and robust method to analyze irregular waves with noise. An attempt to improve the LASA-II method for the highly non-linear waves is achieved by upgrading the wave model to a Stokes-V, LASA-V model.

LASA-V model is tested with the results of physical experiments with highly non-linear wave records. The experiments were also conducted in the LPC-UPV on a 1:50 scale model of a new breakwater for Port of Gijón (Spain), and the data measured in said tests were used to check the LASA-V method. The adjustment of the estimated incident plus reflected waves obtained by the LASA-V method is as good as the estimation of a well-accepted 3-point least squares model (Baquerizo et al., 1997). Furthermore, the coincidences in time between incident wave height and the horizontal forces on the structure and fairly good correlation is obtained.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by the CICYT (Spanish Ministry of Science and Technology) through grant MAR98-0339. Experimental data and economical support provide by the *Autoridad Portuaria de Gijón* is also gratefully acknowledged. The authors wish to acknowledge the assistance of José Andreu, Esther Gómez, Jose Luis Pérez, Julio Lacruz and Santiago Erans in collecting the laboratory data. Special thanks to Miguel Figueres who has developed the LASA-V software and Prof. Miguel A. Losada (*Universidad de Granada*) for his comments. The authors would also like to thank Debra Westall for her assistance in revising the final version of this paper.

REFERENCES

- Baquerizo, A., Losada, M.A., Smith, J.M. and Kobayashi, N. (1997). "Cross-shore variations of wave reflection from beaches." *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 123(5), 274-279.
- Capitao, R. and Carvalho, M.M. (1997). "Separation of Incident and Reflected Spectra in Wave Flumes." *Proc. Int. Conf. Coastal '97 - Computer Modelling of Seas and Coastal Regions III. Computational Mechanics Publications*. 293-302.
- Goda, Y. (1970). "Numerical experiments on wave statistics with Spectral Simulation." *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 9, N° 3, 1970.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976). "Estimation of incident and reflected waves." *Proc., 15th ICCE*, ASCE, 828-845.
- Isaacson, M. (1991). "Measurement of regular wave reflection." *J. Wtrwy., Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 117(6), 553-569.
- Kimura, A. (1985). "The decomposition of incident and reflected random wave envelopes." *Coastal Engineering in Japan*, 28, 59-69.
- Mansard, E.P.D. and Funke, E.R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method." *Proc. 17th ICCE*, ASCE, 154-172.
- Medina, J.R. and Hudspeth, R.T. (1990). "A Review of the Analyses of Ocean Groups." *Coastal Engineering*, ASCE, 14, 515-542.
- Medina, J.R., Hudspeth, R.T. and Fassardi, C. (1994). "Breakwater armor damage due to wave groups". *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 120(2), 179-198.
- Medina, J.R. (2001). "Estimation of Incident and Reflected Aaves using Simulated Annealing." *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, (in press).
- Schäffer, H.A. and Klopman, G. (2000). "Review of multidirectional active wave absorption methods." *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 126(2), 88-97.
- Ward, D.L., Zhang, J., Wibner, C.G. and Cinotto, C.M. (1996). "Wind effects on runup and overtopping." *Proc. 25th ICCE*, ASCE, 2206-2215.
- Zelt, J.A. and Skjelbreia, J.E. (1992). "Estimating incident and reflected wave fields using arbitrary number of wave gauges." *Proc. 23rd ICCE*, ASCE, 777-789.

OVERTOPPING ANALYSIS USING NEURAL NETWORKS

Josep R. Medina,¹ José Alberto González-Escrivá²,
Joaquín Garrido³ and Julien de Rouck⁴

Abstract: Laboratory and prototype overtopping observations of the Zeebrugge breakwater were analyzed using artificial neural networks (NN). An evolutionary strategy was used to calculate a chain of two pruned NN models able to classify “significant” overtopping events ($q > 10^{4.5}$ l/m/s) and to estimate overtopping discharges. This NN methodology proved to be effective for analyzing a small number of data (only 113 cases). Using the complete NN model as a simulator, thousands of virtual tests were generated from which conventional empirical formulae were obtained. Using the classical dimensionless overtopping variable $Q = q/[g H_{m0}^3]^{0.5}$, an exponential formula agreed with the results using the following dependent variables: Rc/H_{m0} , Ir , Rc/Dn and U . More than 80% of the overtopping estimates fell in the half-twice interval of the observed overtopping rates, not as good as the NN model, but very good for most practical applications. The comparison with prototype overtopping measurements was inconclusive because of the lack of proper scaling laws for windspeed in the laboratory and the lack of moderate and high overtopping measurements in the prototype.

INTRODUCTION

The crest level design of sloping coastal structures depends on the appropriate estimation of runup and overtopping discharges. Most design rules are based on results from a variety of flumes and wave basins in which the Froude similarity is used to study the runup and overtopping on scaled models. Overtopping observed in the laboratory is such a

1 Professor, *Laboratory of Ports and Coasts, Universidad Politécnica de Valencia*, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, SPAIN. jrmedina@tra.upv.es

2 Lecturer, *Laboratory of Ports and Coasts, Universidad Politécnica de Valencia*, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN. jgonzale@upvnet.es

3 Res. Asst., *Laboratory of Ports and Coasts, Universidad Politécnica de Valencia*, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN. jgarrido@tra.upv.es

4 Professor, Department of Civil Engineering, University of Ghent, Technologiepark 9, B-9052 Ghent, BELGIUM. julien.derouck@rug.ac.be

highly nonlinear phenomenon that a variety of dimensionless variables, parameters and heterogeneous formulae have been reported in the literature. For instance, the *Coastal Engineering Manual* (2001) provides formulae for rock armored permeable structures, two different overtopping models, three different dimensionless discharge variables and four different dimensionless freeboard variables. Crest freeboard, wave steepness, significant wave height, mean wave period, slope and deepwater wavelength are proposed to estimate overtopping discharges. The overtopping knowledge described in the literature does not show a clear convergence behavior, and although there is an ever increasing number of papers and overtopping data, there is also an increasing number of breakwater typologies, models, formulae, parameters and variables. The overtopping highly nonlinear dependence of wave and structural characteristics makes the problem extremely difficult to solve; small errors in measurements or slight differences in structural characteristics may have a considerable impact on the results.

In addition to the sensitivity of overtopping to the wave and structural characteristics of the scale model tests, there are scale effects induced by the Froude similarity, and it is widely recognized that runup and overtopping rates increase with onshore winds, not considered in most laboratory experiments. In this paper, the overtopping discharges are analyzed on a 1:30 2D model scale of the Zeebrugge breakwater measured in the Wind and Wave Test Facility of the *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV). Medina et al. (2001) described the experimental methodology used in the UPV laboratory and De Rouck et al. (2001) the corresponding prototype overtopping facility at Zeebrugge. The main objective is to estimate the overtopping rates and to evaluate the overtopping scale effects (viscosity, air intrusion, percolation, etc.). A methodology based on pruned artificial neural networks is used in this paper to estimate overtopping rates and to discriminate relevant variables.

Neural networks (NN) are optimization techniques commonly used in artificial intelligence and may be used as a multivariate nonlinear regression method. The main advantage of using NN models for prediction is their capacity of finding nonlinear relationships among the variables, while the main disadvantage is the difficulty in the interpretation of results. Van Gent and Van den Boogaard (1998) used NN with only one hidden layer and a backpropagation learning algorithm to analyze horizontal forces on vertical breakwaters, and Medina (1998) used NN models pruned by simulated annealing for modeling runup of a conventional and a dissipating basin breakwater. In this paper, the evolutionary program described by Medina (1999) is used to optimize the parameters and the topology of pruned NN models to analyze overtopping discharges measured at the UPV Wind and Wave Test Facility.

In this paper, the strengths and weaknesses of NN modeling in knowledge discovery are described as well as the advantages of using parsimonious NN structures to analyze laboratory overtopping data. Firstly, the Zeebrugge model tests performed at the UPV wind and wave flume are described. Secondly, the methodology is described to obtain a NN model by an evolutionary strategy based on only 113 overtopping laboratory observations. Thirdly, an empirical formula with six parameters is obtained based on thousands of simulated overtopping NN estimations. Finally, the empirical and NN estimations are compared to the few available prototype observations at the Zeebrugge breakwater.

ZEEBRUGGE MODEL TESTS

De Rouck et al. (1998, 2001) described the prototype monitoring system of the Zeebrugge breakwater, which has been recently completed with an overtopping measurement system. González-Escrivá et al.(2002) showed the experimental set-up at the UPV Wind and Wave Test Facility. The model was constructed following as closely as possible the prototype instructions (armor block position) so as to build a scale model very similar to the breakwater in the area where the runup wave gauges are placed. Although the Froude similarity was assumed and a 1:30 scale was applied, the scale of the core was lower (1:20) to take into account viscous effects in the model (see Burcharth et al., 1999). The foreshore was replicated using a rough sandy floor and the model materials described above; the 1:30 model was constructed with the topographic information of the prototype.

Waves, water levels and rundown were measured in the laboratory using capacitance wave gauges. Overtopping discharges were measured using a channel and a weighting box. González-Escrivá et al.(2002) described the positions of the capacitance wave gauges used to measure waves and water levels along the wave flume. No problem was detected in the calibration and functioning of the laboratory sensors. The reference wave gauge (Ze1) corresponded to a waverider buoy in the prototype, and the wave gauge at the toe of the model corresponded to an infrared wave gauge in the prototype. The wave characteristics considered in this paper, H_{m0} and I_r , were calculated from the zero and first spectral moments (m_0 and m_1) of the total waves measured at Ze1. The crest freeboard was calculated from the nominal breakwater crest level to the SWL depending on the tide phase. A test matrix was completed (113 tests) covering different water levels (mean to high tides) and storm waves JONSWAP spectrum ($\gamma=3.3$) with different H_s and T_p near the design point ($4.5 < H_s(m) < 7$ and $8 < T_p(s) < 11$).

NEURAL NETWORK MODELING OF OVERTOPPING DISCHARGE

Neural Network (NN) systems belong to a group of optimization techniques commonly used in artificial intelligence (see Ansari and Hou, 1997). NN have proven to be very effective in solving difficult optimization problems in a variety of technical and scientific fields (economics, robotics, design, etc.). NN are inspired by the function of the neurological system of the brain; they are composed of many parallel and interconnected computing units named neurons. NN models may be classified depending on the type of learning strategy, with or without supervision, and the existence of feedbacks in the NN structure. The human brain may be considered an extremely highly complex unsupervised NN with many feedbacks, and a very simple supervised feedforward NN is the most common structure used for NN modeling.

Neural Network Models in Maritime Engineering

Only one hidden layer and a backpropagation learning algorithm is the NN modeling technique variant most frequently used for solving civil engineering problems (see Mase et al., 1995, Van Gent and Van den Boogaard, 1998, and Deo et al., 2002). However, the selection of the number of neurons in the hidden layer is a difficult problem in which both over-simplicity and over-learning have to be prevented. If the number of neurons in the hidden layer is too small, the NN model may be too simple to describe the nonlinear relationships between input and output variables. If the number of neurons in the hidden layer is too large, the NN model fits the learning data but not the test data; the NN model

has an overlearning problem, the same occurs when few data are used to estimate an empirical formula with many parameters. Medina (1999) used the predicted squared error (PSE) proposed by Moody (1992) to analyze the global performance of the alternative full connected NN models considered by Van Gent and Van den Boogaard (1998) pointing out the difficulty in finding the appropriate size of the hidden layer. Therefore, cross-validation is mandatory to validate NN models. Experimental data have to be randomly classified in two groups: a training data set to teach the NN system and a testing data set to validate the model.

Neural Network Models for Overtopping

In this paper, an evolutionary strategy (600+600)-ES similar to that proposed by Medina (1999) was used to calculate reasonable NN overtopping models. The PSE proposed by Moody (1992) was used as a cost function to drive the evolutionary strategy to the optimum NN model. A population of different NN models competed both in structure and parameters in successive generations; the end of the evolutionary process leads to a good NN model which balances simplicity and fitting the learning data according to

$$PSE = MSE \left[1 + \frac{2P}{(N - P)} \right] \quad (1)$$

in which MSE = mean squared error, P = number of free parameters and N = number of training samples. Following the methodology used by Medina (1998) in the NN modeling of runup on dissipating basin breakwaters, a chain of two NN structures was used to classify the overtopping event first ($q > 10^{-4.5} \text{ m}^3/\text{s.m}$), and to estimate overtopping rates when “significant overtopping” was estimated. The limit for the significant mean overtopping discharge was $q = 10^{-4.5} \text{ m}^3/\text{s.m}$, which is approximately the limit of danger for pedestrians and buildings.

The basic experimental data were the observations of 113 experiments (irregular test matrix) carried out in the UPV Wind and Wave Test Facility during the OPTICREST project (see Medina et al., 2001). The observations were randomly separated in two groups: 80% of the cases in the learning data set and 20% of the cases in the testing data set. The overtopping information was used in two formats: 0-1 (significant overtopping or not) and quantitative overtopping discharge. A variety of formulae and variables can be found in the literature to study overtopping, but three are the most popular wave and structural characteristics: wave height, wave period and crest freeboard. Therefore, four climatic and structural variables were considered relevant to describe overtopping in this problem: significant wave height (H_{m0}), Iribarren’s number (Ir), crest freeboard (Rc), and windspeed (U). The specific variables used to feed the NN model were selected considering three common dimensionless variables found in the literature: ($Q = \log(q/[g H_{m0}^3]^{0.5})$), Rc/H_{m0} and Ir), a dimensional windspeed variable U (in m/s), and a complementary variable Rc/D_n which could take into account the permeability and relative void size in the armor layer. Regardless of the *a priori* subjective considerations, the four input variables (Rc/H_{m0} , Ir, Rc/D_n and U) were selected by the evolutionary process as “significant variables”.

In order to estimate the 0-1 classifier NN model, only the learning data set in 0-1 format was used. Because the number of learning data with significant overtopping was much larger than that of the learning data with insignificant overtopping (70 versus 21), a reduced balanced learning data set was obtained selecting all the cases with insignificant overtopping and the same number of cases with significant overtopping randomly chosen among the learning data set (21+21= 42 cases). The 0-1 classifier NN (12 parameters) correctly distinguish the overtopping conditions in 94% of the learning data and 91% of the testing data. Fig.1 shows the 0-1 classifier NN model after evolution; the four input variables were selected but only two neurons in the hidden layer were necessary to properly classify significant and insignificant overtopping cases.

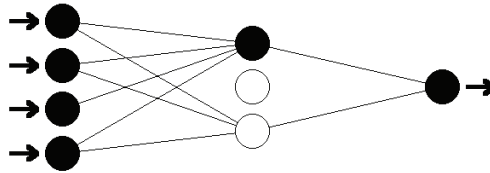


Fig. 1. Classifier NN model for significant overtopping discharges (P=12)

The overtopping estimation NN model was obtained with the information of the significant overtopping cases ($q > 10^{-4.5} \text{ m}^3/\text{s.m}$) in the learning data set. These learning data sets (70 cases) were randomly separated in two groups having 80% and 20% of the data for learning and testing purposes. The relative mean squared error (MSE/Var) of the dimensionless overtopping estimated by this NN model (13 parameters) was 0.16 for the learning data set and 0.12 for the testing data set. Although only few data were available, the PSE proposed by Moody (1992) and used as a cost function to drive the evolutionary strategy provided NN models without overlearning problems.

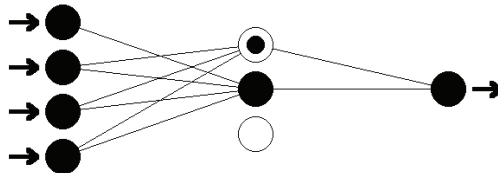


Fig. 2. Estimation NN model of overtopping discharges (P=13)

Fig. 2 shows the overtopping NN model after evolution; similar to the case of the classifier NN model, the same four input variables were selected but only two neurons in the hidden layer were necessary to properly estimate the dimensionless overtopping discharge of cases with significant overtopping.

Verification of the Neural Network Models for Overtopping

To verify the resulting global model (a chain of two NN models), a cross-validation was done on the test data set not used in the learning and testing processes of the individual NN models. The global test data set (22 cases were separated from the 113 original set) was used to compare the NN estimations and experimental observations. Fig. 3 compares NN

estimations and experimental observations of the dimensionless overtopping rate in logarithmic scale. More than 90% of the overtopping NN estimations fall in the half-twice interval shown in Fig. 3 with no errors in 0-1 classification of overtopping cases and a $MSE/Var=0.18$ for the significant overtopping cases ($Q>10^{-6}$).

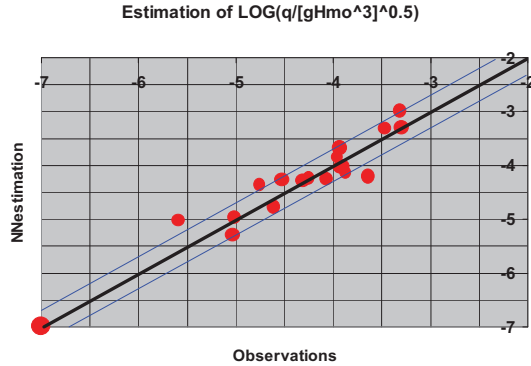


Fig. 3. Comparison of NN estimation and experimental observations (test data)

The complete NN model composed of a chain of two NN models passed the cross-validation test without overlearning. Therefore, it is reasonable to represent in a single figure all the experimental observations and the NN estimations to give a broader view of the quality of the overtopping discharge modeling. Fig. 4 shows that most NN overtopping estimations fall in the half-twice band of the experimental observations.

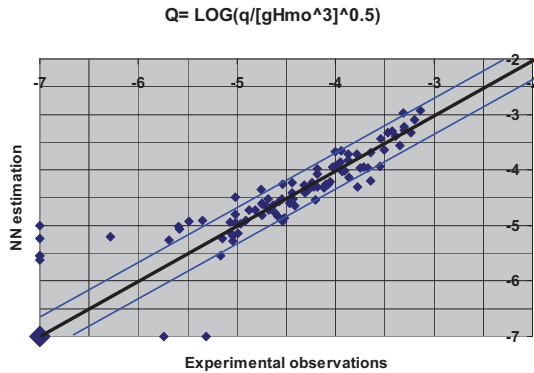


Fig. 4. Comparison of NN estimations and experimental observations (all data)

AN EMPIRICAL FORMULA FOR OVERTOPPING DISCHARGE

The NN model given above is a good estimator of the overtopping rates observed during the OPTICREST experiments at the UPV wind and wave flume. However, the NN scheme is extremely complex; it is a “black box” which estimates the proper output (dimensionless Q) to a given input (Rc/H_{m0} , I_r , Rc/D_n and U). Therefore, although the NN model is a good overtopping estimator, the relationship between the overtopping discharge and any of the wave and structural variables is not evident. The usual formulae may be not as good as NN models for overtopping prediction, but they do provide easy-to-read relationships between input and output variables. In this chapter, the NN model will be used as a simulator (virtual wave flume) in order to provide the large volume of data required to estimate an easy-to-read empirical formula almost equivalent to the NN model.

It is relatively simple to analyze problems when three or fewer variables are involved, and it is not so easy for the human brain to analyze problems with five variables. The overtopping NN model has four significant input variables and one output variable. When a complex problem with many variables has to be analyzed, it is usually a good strategy to divide the problem in steps, analyzing first the most important. In the overtopping problem, it seems that the Rc/H_{m0} and I_r are the most important input variables. Therefore, the overtopping NN model was used as a simulator to provide thousands of dimensionless overtopping discharges (Q) represented in Fig. 5. The ratio Rc/H_{m0} ranged the values 1.20 to 2.50, the Iribarren numbers were fixed to $I_r=3.0, 4.0$ and 5.0 , windspeed was fixed to $U=0$, while two Rc/D_n ratios were simulated: $Rc/D_n= 3.0$ and 4.0 . These ranges of variables roughly correspond to the range of variables tested during the OPTICREST experiments (test matrix) with no wind; therefore, it is expected that the NN estimation provides a reliable interpolation of the observed data free of noise.

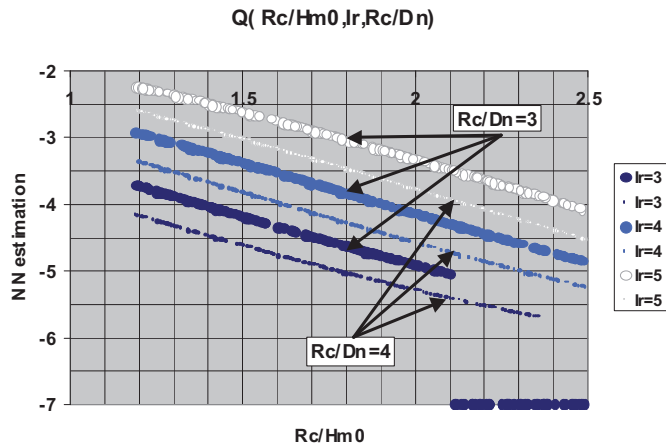


Fig. 5. NN overtopping estimation depending on Rc/H_{m0} , I_r and Rc/D_n

Fig. 5 shows almost straight lines which correspond to an exponential type formula relating the dimensionless overtopping discharges (Q) and the ratio Rc/H_{m0} . It is also evident the influence of the Iribarren number (Ir) and the ratio Rc/Dn . The exponential type formula is common in the literature as well as the ratio Rc/H_{m0} and the Iribarren number (Ir); however, the influence of the ratio Rc/Dn is not common in the literature. The evolutive strategy, which created the overtopping NN model, clearly selected the ratio Rc/Dn as one of the “significant” variables and Fig. 5 shows that effect on the results. Nevertheless, this fact could indicate either the existence of a hidden relationship among $\{Q, Rc, H_{m0}$ and $Ir\}$ not fully described by any function of the type $Q(Rc/H_{m0}, Ir)$, or a “true” relationship between the dimensionless armor and void size (represented by Rc/Dn) and the dimensionless overtopping. With the data analyzed in this paper, it is not possible to solve the dilemma because only one nominal diameter was considered (25 tn Antifer cubes at scale 1:30).

Overtopping Formula without Wind

Fig. 5 shows that Q increases if Rc/H_{m0} decreases; Q increases if Ir increases, and Q increases if Rc/Dn decreases. The first two tendencies are in agreement with intuition and the formulae given in the literature. The dependency of Q on Rc/Dn is not so easy to justify. On the one hand, if Rc/Dn decreases, the permeability of the armor increases and the runup and overtopping rate should decrease; on the other hand, if Rc/Dn decreases, the permeability and relative void size in the breakwater crest increases, as does the overtopping discharge through the crest below the theoretical crest level. By contrast, this apparent dependency could be reflecting some kind of inadequacy of Rc/H_{m0} and Ir to describe the overtopping discharge. Considering approximate parallel lines fitted to the lines shown in Fig. 5, it is possible to create an empirical formula which could approximate the NN estimations; Eq. 2 has been defined to describe the influence of $\{Rc/H_{m0}, Ir, Rc/Dn\}$ ($U=0$) shown in Fig. 5.

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \exp \left[-2.8 - 3.4 \left(\frac{Rc}{H_{m0}} \right) + 1.8(Ir - 4) - 0.9 \left(\frac{Rc}{Dn} - 3 \right) \right] \quad (2)$$

$$Q = \text{LOG}(q/[gH_{m0}^3]^0.5)$$

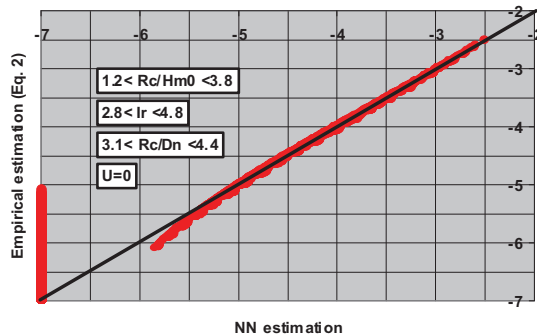


Fig. 6. Comparison of NN overtopping estimations and the empirical formula given by Eq. 2

Once a reasonable empirical formula is defined based on the pattern shown in Fig. 5, it is necessary to verify the agreement between the overtopping formula (four parameters) and the NN model (25 parameters). For verification purposes, 5000 cases were simulated using values of the input variables (Rc/H_{m0} , Ir and Rc/Dn) randomly chosen in the intervals: $1.2 < Rc/H_{m0} < 3.8$, $2.8 < Ir < 4.8$, $3.1 < Rc/Dn < 4.4$ (laboratory experiments). The windspeed was set to $U=0$ for simplicity. Fig. 6 compares the estimation of the dimensionless overtopping discharge given by the NN model with $P=25$ parameters and the empirical formula (Eq. 2) with 4 parameters. The agreement is good if $Q > 10^{-5}$; in Fig. 6, the “insignificant” overtopping events (NN model) are represented by $Q = 10^{-7}$.

The main advantage of using the empirical formula given in Eq. 2 instead of the NN model is simplicity. Because of the good agreement in the most important range of applicability ($10^{-2.5} > Q > 10^{-5}$), it is reasonable to complete the empirical formula to take into account windspeed and to use it as an approximate model similar to those found in the literature.

Overtopping Formula with Wind

The 5000 simulation cases without wind shown in Fig. 6 have been simulated with windspeeds $U=0, 3 \text{ m/s}, 5 \text{ m/s}$ and 7 m/s which were the nominal windspeeds used in the UPV experiments. Because a consistent theory to scale windspeed is not available, the dimensional variable $U(\text{m/s})$ was directly used in the models and has to be taken cautiously when prototype estimations are required. The windspeed must be taken as a qualitative indication more than a quantitative characteristic. Fig. 7 compares the dimensionless overtopping discharge with and without wind according to the NN model. The dimensionless overtopping discharge Q increases if windspeed U increases.

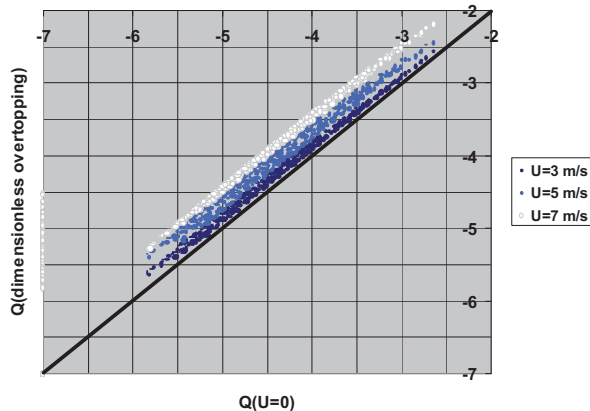


Fig.7. Comparison of overtopping NN depending on windspeed

The pattern shown in Fig. 7 describing the influence of wind is not as clear as the pattern of Fig. 5 describing the influence of $\{Rc/H_{m0}, Ir \text{ and } Rc/Dn\}$ ($U=0$). However, it is

possible to use the former to complete the empirical formula with a wind term:

$$Q = \frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \exp \left[-2.8 - 3.4 \left(\frac{Rc}{H_{m0}} \right) + 1.8(Ir - 4) - 0.9 \left(\frac{Rc}{Dn} - 3 \right) + 0.07(U)^{1.5} \right] \quad (3)$$

in which U(m/s) is the dimensional nominal windspeed used in the OPTICREST laboratory experiments.

On the basis of 113 observations in the experimental data set and a variety of overtopping dimensionless variables found in the literature, a NN model with 25 parameters was obtained. On the basis of this NN model, Eq. 3 was obtained as an approximate empirical formula with only 6 parameters. The main advantage of the empirical formulae is to visualize the main factors affecting overtopping and their relative influence. The main disadvantage of using empirical formulae may be the disagreement with observations; therefore, in order to validate the empirical formula given by Eq. 3, it is necessary to compare the experimental observations with the proposed empirical formula.

Fig. 8 is similar to Fig. 4; the “insignificant” and “no overtopping” events are represented by $Q = 10^{-7}$. The goodness of agreement is slightly better for the NN model (MSE/Var= 13.5%) than the empirical model given by Eq. 3 (MSE/Var= 18.1%). In both models, more than 82% of the estimations fall in the half-twice band of the overtopping experimental observations.

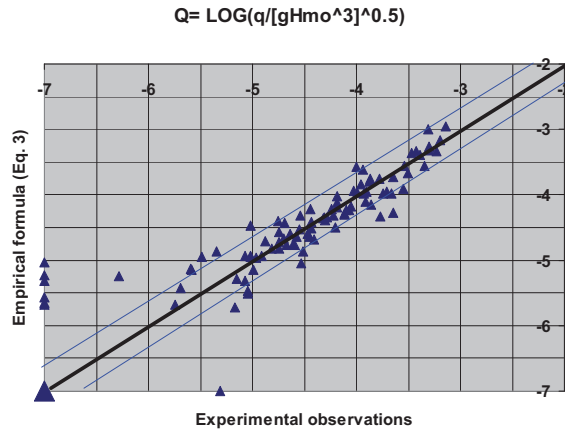


Fig. 8. Comparison of laboratory observations and overtopping estimations given by Eq. 3

Verification with Prototype Observations

Finally, some prototype observations of overtopping events on the Zeebrugge breakwater, collected during storms on the 6th and 7th of November 1999 and the 8th of

November 2001, were compared with laboratory data and the empirical formula given by Eq. 3. The prototype data covered three periods around the high tide points of 6-hour duration divided in 30-minute segments (total: 36 cases). Significant wave height, H_{m0} , mean wave period, T_{01} , mean water level, windspeed, wind direction and overtopping discharge were measured. Wave characteristics were considered comparable to those measured in the laboratory. The windspeed and directions were transformed in windspeed components perpendicular to the Zeebrugge breakwater to compare prototype winds to the laboratory unidirectional winds. The structure model may have some differences with the prototype because the section modeled was not exactly that corresponding to the place where the overtopping measuring system is placed.

The major source of uncertainty in the comparison of the prototype and laboratory results is the scaling of windspeed. The Froude similarity is not valid because viscosity and surface tension are relevant aspects of the overtopping events with small overtopping rates. Furthermore, windspeed in the laboratory is a nominal measurement taken in the wave tunnel; windspeed was much higher on the crest of the breakwater model while windspeed in prototype was probably similar around the breakwater. Fig. 9 compares the laboratory and prototype measurements to the overtopping empirical estimations given by Eq. 3 using the best fitting scale for wind ($U=U_p/1.7$). Nominal windspeed was considered for the laboratory observations and the normal component of the wind measured at the prototype was considered for prototype observations.

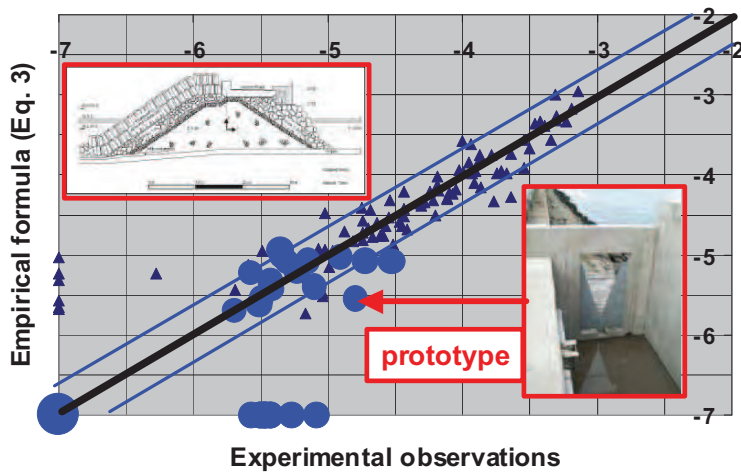


Fig. 9. Comparison of laboratory and prototype observations versus empirical dimensionless overtopping estimations given by Eq. 3

The dispersion of prototype observations is much higher than the laboratory observations and they are only covering the low range of overtopping rates. Additionally, a correct scaling of the windspeed could change significantly the overtopping empirical

estimations corresponding to the prototype observations. For instance, if the Froude similarity was assumed for scaling windspeed, Eq. 3 would overestimate considerably the prototype overtopping observations.

The best fitting windspeed scaling used in Fig. 9 was significantly higher than Froude's scaling ($1/1.7 > 1/[30]^{0.5}$). This may indicate either (1) the overtopping discharges in the prototype are different than predicted in scale models because of model and scale effects, or (2) the windspeed scaling is quite different than Froude's. Therefore, the prototype overtopping representation given by Fig. 9 must be taken with caution due to the fact that model and scale effects may explain why small scale models have different dimensionless runups and overtopping discharges than those of the prototype.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

Laboratory and prototype overtopping observations of the Zeebrugge breakwater are analyzed. A neural network methodology for modeling a highly nonlinear processes with few observations is described. Using an evolutionary strategy and 113 laboratory experimental observations, it was possible to define a chain of two pruned neural networks (25 parameters) able to discriminate significant overtopping events and to quantify the overtopping rates. No overlearning problem was detected in the corresponding cross validation.

Using the NN model as a simulator, thousands of virtual laboratory results were obtained and analyzed in order to define a reasonable empirical formula fitted to the NN results. The empirical formula given by Eq. 3 was based on knowledge from the literature and the NN simulations. The formula did not show as good agreement as the NN model to the original laboratory data but it was much more simple and easier to read (6 parameters instead of 25). The relative mean squared error (MSE/Var) was 13.5% for the NN model and 18.1% for the empirical formula (Eq. 3). In both models, more than 80% of the estimations fell in the half-twice interval of the observed overtopping rates.

Finally, the empirical model (Eq. 3) was compared with the prototype observations of overtopping rates which took place during three high tide and stormy events on the 6th and 7th of November 1999, and the 8th of November 2001. The comparison with prototype overtopping measurements was inconclusive because of the lack of proper scaling laws for windspeed in the laboratory and the lack of moderate and high overtopping measurements in the prototype.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was funded by FEDER and the Spanish Ministry of Science and Technology through grant BFM2001-2759 and the European Union through grants CLASH-EVK3-CT-2001-00058 and MAS3CT97-0116 OPTICREST. The financial support is highly acknowledged. The authors wish to acknowledge the assistance of José Andreu and Esther Gómez in collecting and analyzing the laboratory data, Björn Van de Valle in collecting the prototype data and Juan J. Navarro in developing the neural network software. *Puertos del Estado* provided NEUROPORT 0.1 software for obtaining the NN models.

REFERENCES

- Ansari, N. and Hou, E. 1997. *Computational Intelligence for Optimization*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- Burcharth, H.F., Zhou, L. and Troch, P. 1999. Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests. *Proc. 5th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Cape Town (South Africa)*, 1518-1528.
- Coastal Engineering Manual*. 2001. Part VI-5-2. CEM Editorial Board.
- De Rouck J., Troch P., Van de Walle B. and Medina J.R. 2001. Análisis del remonte y rebase de diques en talud medidos a escala real (in Spanish). L. *Resúmenes de las VI.J.E. de Ing. de Costas y Puertos*, Mallorca, 17-18 May 2001, 165-166.
- De Rouck, J., Verdonck, R., Troch, P., Van Damme, L., Schlütter, F. and De Ronde, J. 1998. Wave runup and overtopping: Prototype versus scale models. *Proc. ICCE'98*, ASCE, 1039-1052.
- González-Escrivá, J.A., Medina, J.R., Garrido, J. and De Rouck, J. 2002. Wind effects on runup and overtopping influencing breakwater crest design. Book of Abstracts 28th ICCE, Paper no. 367.
- Deo, M.C., Gondane, D.S. and Kumar V.S. 2002. Analysis of wave directional spreading using neural networks, *J. Wtrwy, Port, Coast., and Oc. Engng.*, ASCE, 128, 30-37.
- Mase, H., Sakamoto, M. and Sakai, T. 1995. Neural network for stability analysis of rubble-mound breakwaters. *J. Wtrwy, Port, Coast., and Oc. Engng.*, 121(6), 294-299.
- Medina, J.R. 1998. Wind effects on runup and breakwater crest design. *Proc. ICCE'98*, ASCE, 1068-1081.
- Medina, J.R. 1999. Neural network modeling of runup and overtopping. *Coastal Structures '99* (Vol. 1): 421-429. A.A. Balkema.
- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A. and Garrido, J. 2001. Zeebrugge model tests performed in the UPV. *OPTICREST Report*, April 2001.
- Moody, J.E. 1992. The effective number of parameters: An analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems. In J.E. Moody, S.J. Hanson & R.P. Lippmann (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, 847-854. San Mateo California: Morgan Kaufmann Publishers.
- Van Gent, M.R.A. and Van den Boogaard H.F.P. 1998. Neural network and numerical modeling of forces on vertical structures. *Proc. ICCE'98*, ASCE, 2096-2109.

Armor Damage Analysis Using Neural Networks

Josep R. Medina¹, Joaquín Garrido², M. Esther Gómez-Martín³ and César Vidal⁴

Abstract

Two methods are compared to estimate the rubble-mound breakwater armor damage evolution in nonstationary wave conditions. The first method is based on the exponential model on individual waves proposed by Medina(1996). The second method is based on Neural Networks pruned using Evolutionary Strategies. Both methods give reasonably good agreement with laboratory observations.

Introduction

The armor damage and crest level design of sloping coastal structures depends on a wide range of structural parameters and environmental agents. Most design rules are based on results from a variety of flumes and wave basins, in which the Froude similitude is used to study armor damage, runup, overtopping and other phenomena on scaled models. Usually, the structures are tested in stationary conditions for a given “design sea state” or “design conditions”. However, real storms are never stationary events, but nonstationary processes that usually produce accumulated damages on a variety of maritime structures as the armor layer of mound breakwaters. Therefore, new methods to be applied in nonstationary conditions are required to avoid the implicit simplification of the concept “design sea state”. In addition to systematic distortions caused by scale and model effects, laboratory observations are affected by a variety of sources of errors such as those produced by wave gauges and damage observation systems. In order to fix reasonable standards to the laboratory experiments of maritime constructions in Spain, a research project funded by *Puertos del Estado* is being developed by the seven Spanish laboratories currently active in maritime engineering. A series of experiments to study the armor stability dependence on the reflectivity of the structure have been carried out emphasizing the reliability and repeatability of experiments.

¹Professor, and ^{2,3}Assistant Res., *Laboratorio de Puertos y Costas, Univ. Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN; jrmolina@tra.upv.es, jgarrido@tra.upv.es and mgomar00@doctor.upv.es*

⁴Prof. Titular, *Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Univ. de Cantabria, Avda. de los Castros s/n, 39005 Santander, SPAIN; vidal@puer.unican.es*

In this paper, attention is focused on the use of methods based on Neural

Networks (NN) for modeling cumulative armor damage evolution in nonstationary wave conditions. The models analyzed in this paper refer to rubble mound breakwaters in nonbreaking conditions; for structures placed in shallow water, with depth-limited irregular breaking, Kobayashi et al.(2003) have recently published a method focusing on wave heights and water levels as the key environmental variables.

Firstly, the NN methodology is described pointing out the advantages of using pruned NN models by Evolutive Strategies (ES). Secondly, the methods for estimating accumulated armor damage are reviewed from the point of view of the applicability to nonstationary sea conditions. Thirdly, the exponential model proposed by Medina(1996) is fitted to the armor damage measured at the wave flume of the *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV) and the wave flume of the University of Cantabria (UCA). Fourthly, a new NN method to estimate the accumulated armor damage is presented and compared to the exponential model and laboratory observations. Finally, conclusions are given on the use of the NN tools to solve a variety of problems in the area of rubble-mound breakwater stability.

Neural Network Modeling

Neural networks (NN) are optimization techniques commonly used in artificial intelligence. One of the first applications of NN methodology in maritime engineering was done by Mase et al.(1995) who re-analyzed laboratory data obtained a decade before and who used full connected NN models and a backpropagation learning algorithm to estimate armor damage. Van Gent and Van den Boogaard (1998) used NN with only one hidden layer and a backpropagation learning algorithm to analyze horizontal forces on vertical breakwaters, and Medina (1998) used NN models pruned by simulated annealing for modeling runoff of a conventional breakwater and a dissipating basin breakwater. Recently, the European Union (EU) funded Project CLASH (2002-2004) is focused on obtaining a neural network model to predict the overtopping discharges corresponding to a variety of coastal structures (see De Rouck et al., 2003).

NN models emulate the functioning of animal brains with computational elements which emulate neurons, synaptic unions, etc. (see Kosko, 1992). There are a wide variety of NN models, but supervised feedforward multilayer NN models with only one hidden layer and a backpropagation learning algorithm are usually the most common NN modeling techniques (see Van Gent and Van den Boogaard, 1998, and Deo et al., 2002). However, the selection of the number of neurons in the hidden layer is an unsolved problem in which both over-simplicity and over-learning have to be prevented. If the number of neurons in the hidden layer is too small, the NN model may be too simple; if the number of neurons in the hidden layer is too large, the NN model fits the learning data but not the test data.

In order to avoid the shortcomings of the full-connected NN models and the gradient-descent learning algorithms, an evolutionary strategy (ES) inspired in the principles of the Darwinian evolution (see Davis, 1996) is used to optimize both topology and parameters of the NN model. An evolutionary strategy (400+400)-ES, similar to that proposed by Medina (1999) and applied by Medina et al.(2002) to

study overtopping, is used in this paper to optimize the NN pruning connections and neurons and to fit the parameters for a minimum global cost. The predicted mean squared error (PSE) proposed by Moody (1992) was used as cost function to drive the ES to the optimum NN model:

$$PSE = MSE \left[1 + \frac{2P}{(N - P)} \right]$$

in which PSE is the predicted mean squared error, MSE is the mean squared error, P is the number of free parameters and N is the number of cases used for the learning phase. PSE takes into consideration not only the precision of the NN model measured by MSE, but also the simplicity of the model considering both the number of cases used in the learning phase as well as the number of free parameters of the model. The typical least squares method only considers MSE, and it is a reasonable criterion only if $N \gg P$, which is the case of most engineering applications. However, if $N \approx P$ or $N < P$, then $PSE \rightarrow \infty$ although MSE was low; the least squares criterion is irrelevant to obtain a good model.

Rubble-Mound Breakwater Armor Damage Models

Most engineering formulae commonly found in academic literature and design practice are applicable to “design sea state conditions” which implicitly assumes stationary conditions. However, “sea state” is a theoretical concept rarely found in real storms. Sea storms in nature are always nonstationary processes with sea state characteristics moving up and down in time, not only by the intrinsic random behavior of the stationary stochastic processes, but also by the clear nonstationary behavior of the stochastic processes observed in real sea storms. Furthermore, the armor failure of mound breakwaters is caused by accumulated damages which produces a given armor erosion, and it is evident that accumulated damages are caused by different sea state conditions during the same storm or successive storms. Therefore, new methods for estimating the accumulated armor damage are required to be applied in nonstationary conditions.

Two decades ago, SPM(1984) proposed a simple method for estimating armor damage which has been widely used both in scientific studies and design practice. In nonbreaking conditions, the armor damage estimated using SPM(1984) depends on four structural characteristics and only one environmental variable: the significant wave height. Environmental variables as important as the mean period and storm duration were not considered; therefore, the armor damage estimations given by SPM(1984) could be considered the conservative upper limit for any mean wave period and any storm duration. Van der Meer (1988) proposed a complex formula for estimating armor damage that has been widely referred in literature. Van der Meer’s(1988) formulas included the average wave period and the number of waves (duration of the storm) but the proposed damage function reach its maximum level with 7,000 waves. Stationary sea state conditions were implicitly assumed by

the method.

Teisson(1990) proposed a method for estimating accumulated armor damage based on the concept of “equivalent design wave height”. The accumulated armor damage was dependent on the $H_{1/3}$ and the duration of the storm, but the hypothesis of equivalence implicitly assumed in the method of Teisson(1990) made the method applicable to nonstationary processes. Based on numerical simulations, Vidal et al.(1995) proposed the use of the average height of the $N_w=100$ largest waves of the sea state, H_{100} , as the appropriate characteristic wave height for use in rubble-mound breakwater stability formulas. Although the H_{100} characteristic value was originally proposed to take into account the different wave height distributions that may be associated with the same variance spectrum in stationary conditions, this concept may be easily applied to nonstationary processes (see Medina, 1996). Therefore, the methods proposed by Teisson(1990) and Vidal et al.(1995) are both applicable to nonstationary processes, although wave periods were not considered.

Medina(1996) proposed six conditions for acceptability of an armor damage model applicable to nonstationary processes. Based on numerical simulations, Medina(1996) proposed an exponential model applicable to individual waves attacking the breakwater and compared the results with the models of Teisson(1990), Smith et al.(1992), and Vidal et al.(1995). Although the method proposed by Medina(1996) considered the wave period characteristics of individual waves, no experimental contrast was provided.

In this paper, the exponential method of Medina(1996) was contrasted with laboratory experimental observations. Additionally, a new method based on NN is proposed and compared with the exponential model. Both methods take into account the wave period characteristics and are applicable to nonstationary processes.

Exponential Model for Estimation of Accumulated Armor Damage

The exponential model on individual waves proposed by Medina(1996) take into consideration both wave heights and wave periods, and this model was applicable to nonstationary conditions. The exponential model is used for describing events occurring at random times with a constant future lifetime as well as in a variety of life-testing applications. The exponential model for the armor damage under regular wave attack is described by

$$D(H, Ir, N) = D_0(H, Ir)(1 - \exp[-kN]) = D_0(H, Ir)(1 - 2^{-N/n50\%}) \quad (1)$$

in which D is the dimensionless armor damage, H is the wave height, Ir is the Iribarren’s number, N is the number of regular waves, $D_0(H, Ir)$ is the asymptotic maximum damage corresponding to a given combination of H and Ir. The exponential parameter $n50\%=1/k$ is the number of regular waves that causes 50% of the damage. Gómez-Martín et al.(2003) have estimated the parameter $n50\%$ in experiments carried out in the wave flume of the *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV) using runs of 50 regular waves until the maximum damage $D_0(H, Ir)$ was obtained, with periods corresponding to Iribarren’s number $Ir=2.5$ and $Ir=3.5$.

The parameter $n50\%$ was found to be dependent on Ir and was estimated as follows: $n50\%(Ir=2.5)=110$ and $n50\%(Ir=3.5)=35$.

Figure 1 describes the longitudinal cross section of the UPV wave flume (30x1.2x1.2 meters) and the rubble-mound breakwater model in non-breaking conditions used for the stability experiments. Armor elements were painted in different colors, the bottom armor layer in yellow for contrast and the upper armor layer in bands of different colors; armor damage was measured using photograph processing, profilers and visual counting. Visual counting was considered the most precise and reliable method for the low and moderate damage levels measured in these experiments. Wave gauges (S1 to S7) were placed to analyze incident and reflected waves using the LASA method (see Medina, 2001).

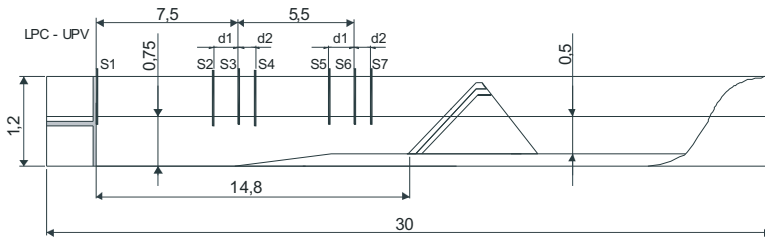


Figure 1. Longitudinal cross section of the UPV wave flume (dimensions in meters).

The exponential model applied to irregular waves requires the previous identification of the individual incident waves attacking the structure. Taking derivatives in Eq. 1, the formulas to be applied to individual incident waves are

$$D_i = D_{i-1} + (1/n50\%)_i \ln 2(D_{0i} - D_{i-1}) \quad \text{if } D_{0i} > D_{i-1} \quad (2a)$$

$$D_i = D_{i-1} \quad \text{if } D_{0i} < D_{i-1} \quad (2b)$$

in which D_i is the accumulated armor damage after the i^{th} wave and $D_{0i} = D_0(H_i, Ir_i)$ is the asymptotic maximum damage corresponding to i^{th} wave. The exponential parameter $(n50\%)_i$ is the number of waves, in a regular train with the characteristics of the i^{th} wave, that causes 50% of the maximum damage, $D_{0i} = D_0(H_i, Ir_i)$. To apply Eq. 2 to a given structure, it is necessary to define: (1) the incident wave train $\{H_i, T_i\}$ to calculate $\{H_i, Ir_i\}$, (2) the damage function $D_0(H, Ir)$ corresponding to regular wave trains, and (3) the exponential parameter $n50\%$ which has been found to be dependent on Ir . In this paper, the parameter $n50\%=110$ was used for $Ir \leq 2.5$, $n50\%=35$ was used for $Ir \geq 3.5$, and $110 > n50\% > 35$ was linearly interpolated between $2.5 < Ir < 3.5$ (see Gómez-Martin et al., 2003).

To estimate the damage function for regular waves, $D_0(H, Ir)$, data from two Spanish laboratories were used. The description of the UPV wave flume is given above and the longitudinal cross section of the wave flume of the *Universidad de Cantabria* (UCA) is given in Figure 2. The rubble-mound breakwater cross section

and test program was very similar in both laboratories; however, there were differences in facilities and equipment as wave-making (active absorption or not), water depth in the paddle, lengths and widths of the flumes, etc. Because incident wave characteristics were considered for the stability analysis, using the LASA method for separating incident and reflected waves (see Medina, 2001), it was not evident if both laboratories obtained the same structural response. The methodology based on pruned NN used in this research proved that the structural responses observed by the two laboratories had insignificant differences; therefore, the data from the two laboratories were used to estimate the damage function, $D_0(H,I_r)$.

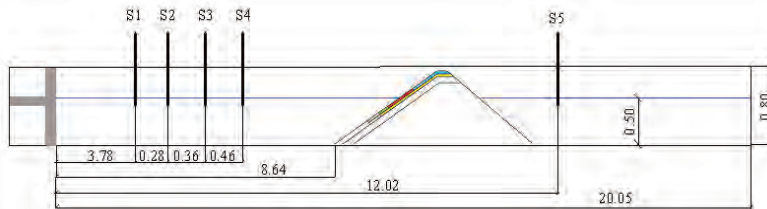
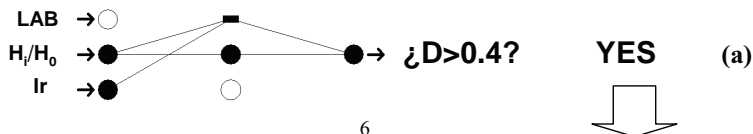


Figure 2. Longitudinal cross section of the UCA wave flume (dimensions in meters).

The dimensionless damage ($D=S/D_{n50}$) observed in 149 regular tests carried out in the UPV and UCA laboratories were randomly grouped in the learning data (80%) and testing data (20%). Three input variables were considered: (1)laboratory, 0=UPV and 1=UCA, (2)incident Iribarren's number, I_r , and (3)relative incident wave height, H_i/H_0 . The output variable was the linearized dimensionless damage $D^*=D^{0.2}$. A chain of two NN models was estimated using the pruned NN methodology proposed by Medina(1998) and Medina(1999). A first NN model was estimated in order to classify significant and insignificant damages, and a second NN model was estimated to quantify the damage. The damage function for regular waves, $D_0(H,I_r)$, was that defined by the chain of two NN models.

In order to estimate the NN classifier, the damage observations of the learning and testing data were transformed in 0 ($D \leq 0.4$) and 1 ($D > 0.4$) outputs. The ES eliminated the laboratory input in both NN models; therefore, the laboratory was not a significant input to explain the observed armor damage. In other words, damage observations from the UPV and UCA laboratories have a similar nonlinear relationship to the input variables H_i/H_0 and I_r . The ES eliminated all neurons in the hidden layer except a linear neuron and a sigmoidal neuron in both NN models. The NN classifier obtained less than 7% of errors and a $(MSE/Var)_{test} = 27\%$ was obtained; the models were cross-validated. Figure 3 shows the scheme of the NN classifier (a) and NN quantifier (b). Figure 4 shows the damage observations and NN estimations using the NN models described above with the 80% and 95% confidence bands.



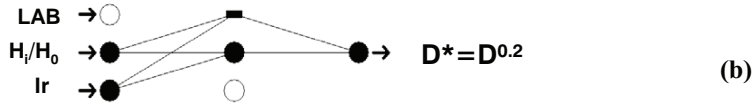


Figure 3. Schemes of the NN classifier and NN quantifier of armor damage.

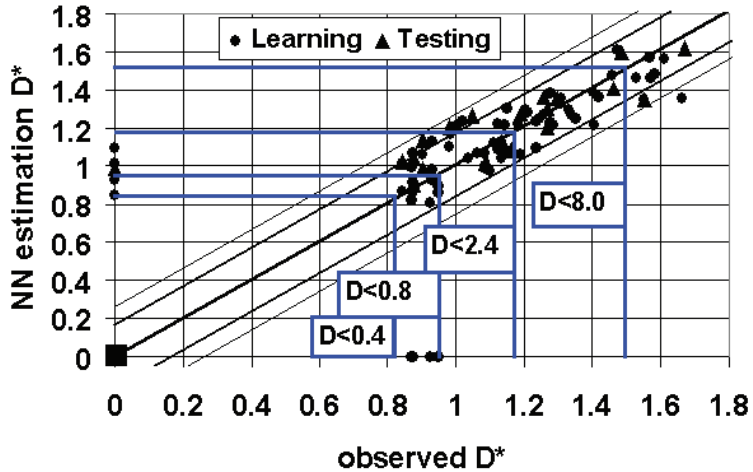


Figure 4. Comparison of measured and NN estimated armor damage (regular waves).

The chain of two NN models described above estimated the armor damage, D , as function of the relative incident wave height, H_i/H_0 , and the Iribarren's number, Ir . It is also possible to define an inverse NN model using the armor damage and the Iribarren's number as inputs and the output was the relative incident wave height, H_i/H_0 . Figure 5 shows the scheme of the inverse NN model used to estimate the failure functions for different damage levels.

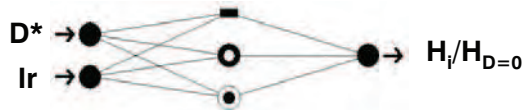


Figure 5. Scheme of an inverse NN model used to estimate failure functions.

Figure 6 shows the failure functions estimated with the NN model

corresponding to $D=0.4$ (insignificant damage), $D=0.8$ (start of damage), $D=2.4$ (Iribarren's damage), and $D=8$ (start of destruction).

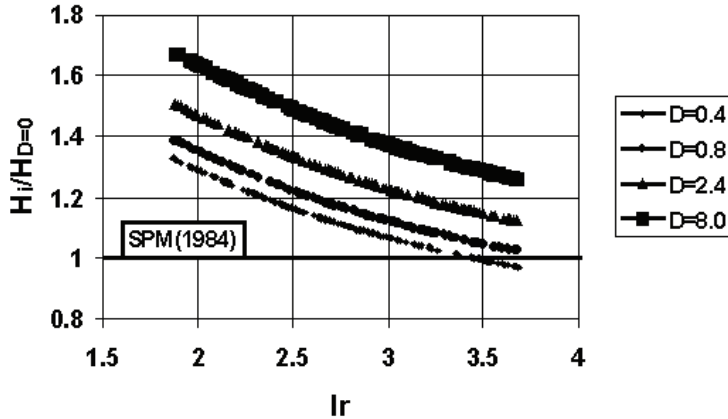


Figure 6. Failure functions corresponding to an inverse NN model (regular waves).

Taking into consideration the exponential parameter $n_{50\%}$ proposed by Gómez-Martín et al.(2003) and the NN model for $D_0(H_i, I_r)$ described above, Eq. 2 may be used to estimate the accumulated armor damage. This exponential method is applicable to stationary and nonstationary conditions and requires knowledge of the wave height and wave period of the individual waves attacking the structure.

Neural Network Model for Estimation of Accumulated Armor Damage

A new NN model is proposed to estimate the accumulated armor damage in nonstationary conditions. The data for learning and testing were obtained in the UPV wave flume; two series of irregular trains ($I_r=2.5$ and $I_r=3.5$) with increasing significant wave height were repeated six times from zero damage to destruction. Damage was measured before and after each run ($N_w \approx 900$ waves) and incident wave characteristics were estimated using the LASA method of Medina(2001). Incident wave attack was characterized by the significant wave height (H_{m0i}) and the mean period (T_{01i}), $I_r = (\tan \alpha) / (H/L_0)^{0.5} = (1/1.5) / (2\pi H_{m0i} / g T_{01i}^2)^{0.5}$.

The NN structure considered to estimate the accumulated armor damage has three input variables: (1)incident Iribarren's number, I_r , (2)relative incident significant wave height, $1.27 H_{m0i}/H_0$, and (3)armor damage before the wave attack. The output was the armor damage after the wave attack. The NN model is able to estimate the evolution of accumulated armor damage from zero damage to destruction caused by series of $N_w = 900$ irregular waves characterized by $\{H_{m0i}, T_{01i}\}$. Figure 5 shows the scheme of the NN model to estimate accumulated armor damage in nonstationary conditions.

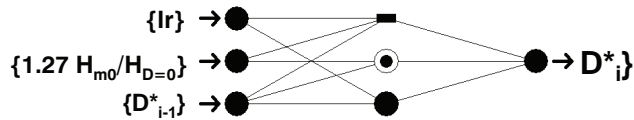


Figure 5. NN scheme to estimate the evolution of accumulated damage.

I_r and H_{m0} are the Iribarren's number and the significant wave height of the $N_w=900$ irregular wave train, and D^* is the linearized dimensionless armor damage ($D^*=D^{0.2}$). D^*_{i-1} is the armor damage before the wave attack and D^*_i is the armor damage after the wave attack.

Figure 6 shows the comparison between estimated and measured armor damages. The 57 irregular tests carried out in the UPV wave flume were used to estimate the NN model. Approximately 70% of the data were used for learning and 30% for testing; PSE/Var=18% was obtained in the learning phase and MSE/Var=16% in the testing phase. Therefore, the NN model was cross-validated and accepted to estimate the evolution in time of the accumulated armor damage. The measured armor damages below $D=0.4$ were considered insignificant damages as was considered in the case of regular waves.

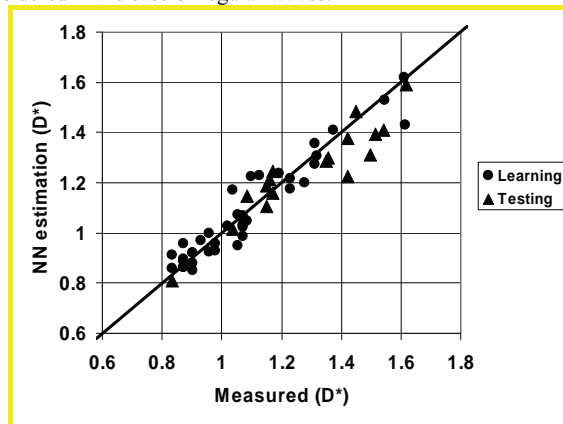


Figure 6. Comparison of measured and estimated armor damage (irregular waves).

The NN model for estimating accumulated armor damage in nonstationary conditions may also be used to estimate the evolution of armor damage in stationary conditions. For instance, Figure 7 shows a typical estimation of armor damage evolution using the NN model compared to the parametric model proposed by Van der Meer(1988) using permeability parameters $P=0.4$ and $P=0.5$. The NN model gives systematic lower values of the armor damage for the same input wave characteristics; Figure 7 refers to $I_r=3.5$, $H_{m0}=10$ cm.

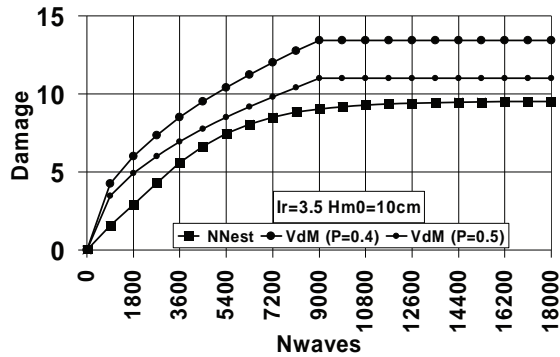


Figure 7. Estimation of accumulated armor damage in stationary conditions.

The series of tests using random waves with increasing significant wave height can be used to check the exponential and NN model in nonstationary conditions. Six repetitions of the series of experiments were carried out for Iribarren's number 2.5 and 3.5. Figure 8 shows a typical case comparing the exponential and NN estimations of accumulated damage to measurement and 80% confidence band (experiment repeated six times) of the measured damage. Both the exponential model on individual waves and the NN model provide reasonably good estimations of the evolution in time of the observed accumulated armor damage.

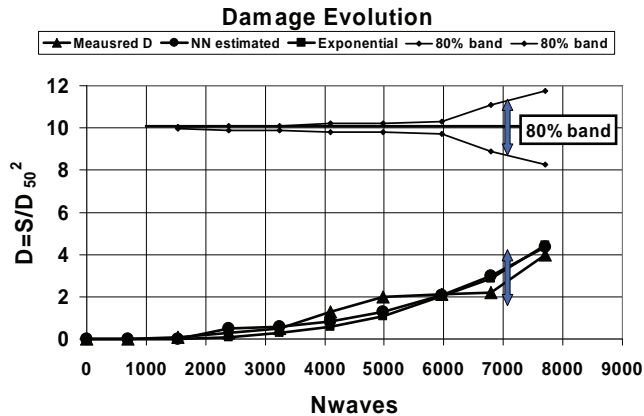


Figure 8. Comparison of measured and estimated accumulated armor damage in nonstationary conditions using the exponential model and the NN model.

Summary and Conclusions

The need for new methods to estimate the accumulated armor damage in nonstationary conditions is highlighted in this paper. Two methods are described in this paper: (1) an exponential model on individual incident waves, and (2) a Neural Network (NN) model on short series of random waves.

The exponential model on individual incident waves presented in this paper is based on the conceptual model described by Medina(1996). The experimental basis of the exponential model were 149 tests using regular waves carried out in the UPV and UCA wave flumes. The Evolutive Strategy (ES) used to define the NN model for regular waves found that laboratory was an irrelevant input to describe the armor damage; therefore, the differences between the UPV and UCA facilities were considered not causing significant differences in the experimental results. The exponential parameter $n_{50\%}$ was found to be dependent on the Iribarren's number, I_r , being $n_{50\%}(I_r=2.5) \approx 110$ and $n_{50\%}(I_r=3.5) \approx 35$. The estimation of accumulated armor damage using the exponential model showed a good agreement to damage observations of UPV tests on random waves in nonstationary conditions.

The new NN methodology presented here is applicable to short series of stationary random waves (in this paper: $N_w=900$ waves). The estimation of accumulated armor damage using the NN model also showed a good agreement to damage observations of UPV tests on random waves in nonstationary conditions. The NN model estimated lower accumulated armor damage than those predicted by the formulas of Van der Meer(1988) for sea stationary conditions.

The methods based on NN models obtained by ES shown in this paper may be used for evaluating the significance of the differences of experimental results obtained from different laboratories.

Acknowledgements

This research was funded by *Puertos del Estado*, the *Ministerio de Fomento (Acción Estratégica de Construcción Civil)* and the Ministry of Science and Technology through grant BFM2001-2759. M. Esther Gómez-Martín obtained financial support from the *Secretaría de Estado de Educación y Universidades*. J.J. Navarro developed the NN code.

References

- Davis, L. 1996. *Handbook of Genetic Algorithms*. London: International Thompson Computer Press.
- De Rouck, J., Van de Walle, B., Van Damme, L., Kortenhaus, A., and Medina, J.R.(2003). Full Scale Wave Overtopping Measurements. *Proc. Coastal Structures 2003*, ASCE.
- Deo, M. C., Gondane, D. S. and V. S. Kumar (2002). Analysis of wave directional spreading using neural networks, *J. Watrwy, Port, Coast., and Oc. Engng.*, ASCE, 128, 30-37.
- Gómez-Martín, M.E., Garrido, J. and Medina, J.R.(2003). Estudio Experimental de la Variabilidad y Evolución de la Avería en el Manto Principal de Diques en Talud

(in Spanish). *Libro de ponencia de las. VII Jornadas Españolas de Puertos y Costas*, Fundación Ingeniería del Agua (in press).

Kobayashi, N., Pozueta, B., and Melby, J.A.(2003). Performance of Coastal Structures against Sequences of Hurricanes. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 129(5):219-228.

Kosko, B. 1992. *Neural Networks and Fuzzy Systems*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.

Mase, H., Sakamoto, M., and Sakai, T.(1995). Neural network for stability analysis of rubble-mound breakwaters. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg.*, 121(6), 294-299.

Medina, J.R., Hudspeth, R.T., and Fassardi, C.(1994). Breakwater armor damage due to wave groups. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 120(2), 179-198.

Medina, J.R. (1996). Wave climate simulation and breakwater stability. *Proc. ICCE 1996*, ASCE, 1789-1802.

Medina, J.R. (1998). Wind effects on runup and breakwater crest design. *Proc. ICCE 1998*, ASCE, 1068-1081.

Medina J.R. (1999). Neural network modeling of runup and overtopping. *Coastal Structures '99* (Vol. 1): 421-429. A.A. Balkema.

Medina, J.R.(2001). Estimation of Incident and Reflected Waves Using Simulated Annealing. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 127(4):213-221

Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., J. Garrido and J. De Rouck(2002). Overtopping Analysis using Neural Networks. *Proc. ICCE 2002*, ASCE, 2165-2177.

Moody, J.E. (1992). The effective number of parameters: An analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems. In J.E. Moody, S.J. Hanson & R.P. Lippmann (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, 847-854. San Mateo California: Morgan Kaufmann Publishers.

Shore Protection Manual (1984). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory, USAE Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.

Smith, W.G., Kobayashi, N., Kaku, S.(1992). Profile Changes of Rock Slopes by Irregular Waves. *Proc., 23rd Int. Conf. on Coastal Engrg.*, 1559-1572.

Teisson, C.(1990). Statistical Approach of Duration of Extreme Storms:

Consequences on Breakwater Damages. *Proc. ICCE 1990.*, ASCE, 1851-1860.

Van der Meer, J.W. (1988). Deterministic and Probabilistic Design of Breakwater Armor Layer. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 114(1), 66-80.

Van Gent, M.R.A., and H.F.P. Van den Boogaard (1998). Neural network and numerical modeling of forces on vertical structures. *Proc. ICCE 1998*, ASCE, 2096-2109.

Vidal, C., Losada, M.A. and Mansard, E.P.D. (1995). Suitable Wave-height Parameter for Characterizing Breakwater Stability *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 121(2), 88-97.

STUDY OF REFLECTION OF PERFORATED VERTICAL BREAKWATERS

Joaquín M. Garrido¹ and Josep R. Medina²

Experimental coefficients of reflection (CR) corresponding to one-, two- and three-chamber caisson models of the Jarlan-type breakwater are presented. Breakwater models with single-chamber show $CR < 40\%$ in the range $0.1 < B/L < 0.3$, similar to CR estimated by formula obtained during PROVERBS project. Experimental CR is compared to the formula given by Fugazza and Natale (1992); this formula overestimates experimental results. Neural Network (NN) models are proposed to describe the nonlinear relationship observed between CR and the structural and wave conditions for perforated and slotted walls. The NN models showed relative mean squared error (MSE/Var) lower than 6% predict the response of the structure to incident waves.

1. INTRODUCTION

The construction of caissons for vertical breakwaters and quays on the Spanish coast has increased dramatically over the last decade. The over-exploitation of coastal quarries and environmental constraints of classical mound breakwaters has favored the construction of caissons. Caisson-type vertical breakwaters have environmental advantages compared to classical mound breakwaters as well as some drawbacks such as wave reflection. Most of the inconveniences of caisson-type vertical breakwaters are associated with the high coefficient of reflection (CR) corresponding to the vertical impermeable wall, which leads to the reflection of most incident wave energy and a standing wave pattern in front of the wall. Most of these drawbacks can be mitigated can be mitigated by reducing the CR. Therefore, new typologies of low reflectivity vertical breakwaters and quaywalls require further research to examine reflection behavior of such structures.

Low reflectivity vertical breakwaters

Breakwaters with low reflectivity may reduce wave reflections by incorporating permeable walls separating one or more chambers, chambers which can dissipate wave energy. Considering Jarlan's one-chamber scheme,

¹ Laboratory of Ports and Coasts, ETSI Caminos, *Universidad Politécnica de Valencia*, Camino de Vera 14, 46071 Valencia, SPAIN; jgarrido@tra.upv.es, jmedina@tra.upv.es

wave incident on the vertical breakwater is partly reflected from the external front face and partly transmitted to the chamber; incident energy is lost mainly due to oratory the perforated or slotted wall. The transmitted wave is then reflected from the back face, again undergoing energy loss and reflection in its passage through the permeable wall. The multi-reflection of waves within the chamber also consumes energy resulting in partially standing waves in front of the vertical breakwater. The CR mainly depends on the phases and energy losses within the chamber; the two most important variables are the wave length (L) and the distance (B) between the front permeable wall and back impermeable face. The maximum energy loss should occur when the velocity induced by the partially standing wave system within the chamber is maximum at the wall: $B \approx L[(1+2n)/4]$; $n=0,1,2,\dots$. CR also depends on the permeability of the front wall; if the permeability of the front wall is low, the incident waves will be almost totally reflected from the front wall. If the permeability of the front wall is very high, nearly complete reflection will occur from the back impermeable face. Therefore, there is an optimum permeability of the front wall for minimum reflection. Additionally, there are other characteristics affecting wave attenuation efficiency such as water jets from the wall holes or different depths inside and outside the chambers. A similar qualitative description for multi-chamber schemes can be formulated; however, it is evident that many structural parameters affect the reflectivity behavior of Jarlan-type vertical breakwaters: the number of chambers, the widths of each chamber, the shape of the holes, the porosities of the walls, etc.

Since the early application of this concept given by Jarlan (1961, 1965) and the application in Canada (Comeau Bay, 1966) and in Japan (Kobe Port, 1969 and Takamatsu Port, 1970), new types of vertical breakwaters with a low CR have been designed and constructed in numerous countries. Several new concepts have been proposed in Japan, where slit-type caissons, curved slit-caissons, and multicellular caissons have been developed successfully (Takahashi, 1996).

The first major experimental study analyzing low reflectivity vertical breakwaters can be attributed to Jarlan (1961), who carried out laboratory tests (1:30 scale) with a perforated caisson of one chamber and 49% porosity. Jarlan found that the reduction of the CR was significant for certain values of wavelength. Jianyi (1992) described the design of a perforated caisson breakwater and presented the results of model tests; tests with regular and irregular waves demonstrated that perforated caisson breakwaters have the advantages of low CR as well as reduction in runup and overtopping. Bergmann et al.(2000) compared reflection results for breakwaters with one chamber and several chambers and verified the reduction of forces on the multi-chambers scheme for a greater range of frequencies than that obtained with a single chamber. Tabet-Aoul and Lambert (2003) carried out tests within the European Project PROVERBS and proposed an empirical method to calculate maximum horizontal forces. The results were checked with prototype measurements.

To calculate the coefficients of reflection and transmission of a breakwater with two perforated walls Kondo (1979) presented a theoretical model, based on the long wave theory. Fugazza and Natale (1992) proposed a closed-form solution for CR from a multi-chamber perforated-wall caisson. They showed that the reflection is minimized when the wave chamber width is equal to approximately one quarter of the incident wave length. Suh and Park (1995) described a model to predict the reflection coefficients of a perforated-wall caisson mounted on a rubble mound foundation under oblique wave attack. They also specified a method for estimating the CR of irregular waves from perforated-wall caisson breakwaters. Takahashi et al. (2002) applied a VOF numerical method to estimate the CR of a perforated caisson. Kakuno et al. (2003) applied a procedure of design based on the numerical method BIM (Boundary Integral Method) so as to obtain a maximum reflection coefficient of 40% in a wider frequency range for double slit-wall breakwaters.

In this paper, CR is measured in a series of experimental tests of different physical models corresponding to the Jarlan-type breakwater (Jarlan, 1961). The results are compared with the numerical F&N model given by Fugazza and Natale (1992); finally, the Neural Network (NN) methodology is used to model the nonlinear relationship observed between CR and the structural and wave conditions.

2. PHYSICAL MODEL TESTS

Experiments were conducted in the wave flume in the Laboratory of Ports and Coasts at the *Universidad Politécnica de Valencia* (LPC-UPV) (Fig. 1) to verify the reflection behavior of several perforated-wall breakwater caisson models with one, two and three chambers.



Figure 1. Longitudinal cross section of the LPC-UPV wave flume.

The number of tests conducted at the LPC-UPV wave flume were: 1200 regular wave tests and 80 irregular wave tests for the perforated caisson with slotted walls (Fig. 2) and 600 regular wave tests and 80 irregular wave tests for the perforated caisson with holed walls (Fig. 3). For each model type, several chamber widths [$20 < B(\text{cm}) < 60$] were tested with different porosities of the walls: $0.05 < p(A_p/A_s) < 0.35$ for holed walls and $0.2 < r(A_p/A_s) < 0.5$ for slotted walls. Tests with regular and irregular waves were done with wave heights of regular wave trains in the range of $0.04 < H(\text{m}) < 0.16$ and wave periods in the

range of $0.6 < T(s) < 3.5$. The irregular wave series were conducted with significant wave heights ranging $0.04 < H_s(m) < 0.15$ and a peak period ranging $1 < T_p(s) < 2.5$.

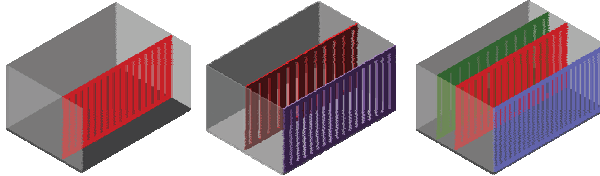


Figure 2. Perforated-wall caisson with slots.

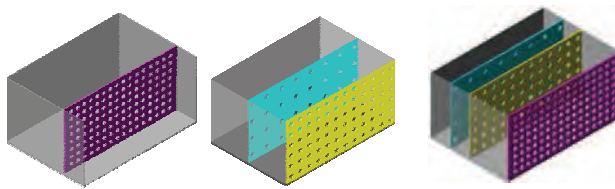


Figure 3. Perforated-wall caisson with holes.

The incident and reflected waves were analyzed using the time-domain LASA method (Medina, 2001), which separates nonlinear incident and reflected waves in nonstationary conditions.

3. ANALYSIS AND RESULTS

Comparison with Numerical Model

Fugazza and Natale (1992), whose numerical model is referred here as the F&N model, proposed a closed-form solution for wave reflection from a multi-chamber perforated-wall caisson. They reported that the reflection is minimized when the wave chamber width is about one quarter of the wave length. This method assumes monochromatic, long-crested and small-amplitude waves normally incident on the barrier, and the still water depth is the same inside and outside the chamber. The F&N model was originally calibrated with experimental results using regular waves given by Liberatore (1974) and Kondo (1979) and to the experiments with irregular wave presented by Sawaragi and Iwata (1979).

In this paper, the estimation of CR obtained by the F&N model was compared with the experimental measurements corresponding to holed and slotted perforated walls of single and multi-chamber caissons. Figures 4 compares the CR estimated by the F&N model and the experimental CR measured from perforated walls with holes.

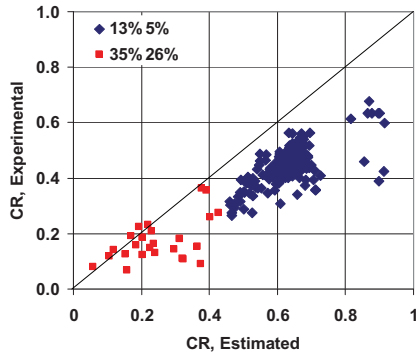


Figure 4. Comparison of experimental and estimated CR using F&N formula for 2-chamber.

Figure 5 compares the CR estimated by the F&N model and the experimental CR measured from perforated walls with slots.

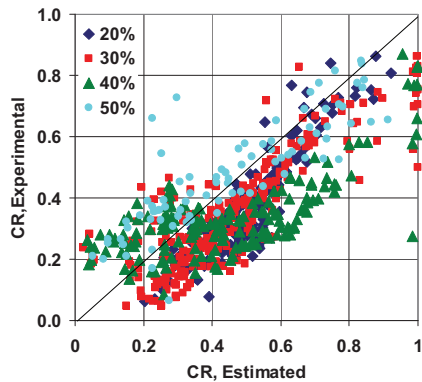


Figure 5. Comparison of CR estimated by F&N formula and experimental CR for 1-chamber caisson with slotted wall.

The estimation of CR by the F&N model is reasonable for both slotted and holed wall caissons although this model tends to overestimate CR.

Experimental Results

Experimental tests with perforated caisson breakwaters were carried out considering different porosities for holed walls (Fig. 6) and slotted walls (Fig. 7). Slotted and holed perforated walls show similar CR for similar porosity and minimum CR is obtained when porosity ranges from 20% to 30%. Single-chamber breakwater models show CR smaller than 40% in the range $0.1 < B/L < 0.3$.

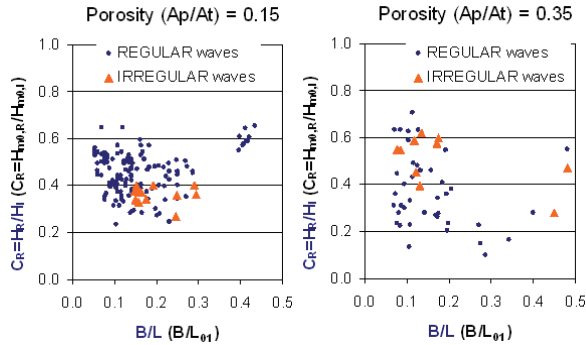


Figure 6. Experimental CR for 1-chamber caisson with holed wall.

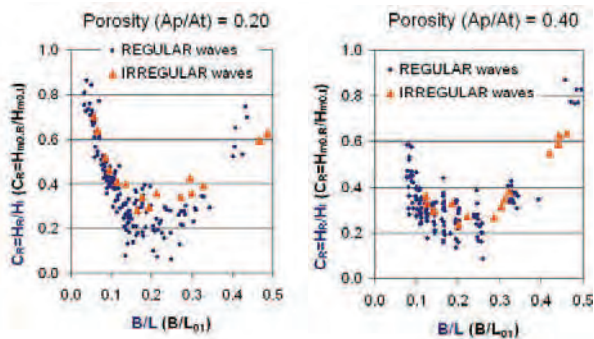


Figure 7. Experimental CR for 1-chamber caisson with slotted wall

Experimental tests of 2-chamber and 3-chamber breakwater models do not show the relationship between CR and B/L which typically corresponds to the

simpler case of 1-chamber breakwaters. The CR shows a lower value in a wider range of B/L , and this characteristic is even more pronounced for 3-chamber breakwaters. For values of B/L greater than 0.35, multiple-chamber breakwaters are better at reducing the reflection than single-chamber breakwaters. Figures 6 to 8 also show results corresponding to irregular wave tests.

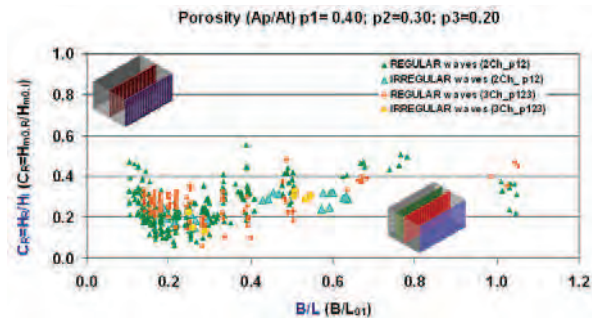


Figure 8. Experimental CR for 2-chamber and 3-chamber caisson with slotted wall.

4. NEURAL NETWORK MODELS

NN are inspired in the functioning of the nervous system of animals and use concepts as neurons, axon and synaptic junctions, in which the input-output relationship is captured by the NN model. NN can be considered multi-parametric nonlinear regression methods which are able to capture hidden complex nonlinear relationship between input and output variables.

Numerous applications based on backpropagation learning algorithms have been proposed to solve maritime engineering problems. Medina (1999) used the predicted squared error (PSE) proposed by Moody (1992) to analyze the global performance of pruned NN models as an alternative to fully-connected NN models as the one considered by Van Gent and Van den Boogaard (1998) who pointed out the difficulty in finding the appropriate size of the hidden layer. Medina et al. (2002) used pruned feedforward NN models optimized by evolutionary strategies guided by PSE to estimate the overtopping discharges of mound breakwaters and a methodology to reconstruct time series of sea state variables recorded from the wave measurement network presented by Medina and Serrano (2004).

In the present application, the full connected NN methodology of MATLAB Toolbox is implemented to model the nonlinear relationship observed between CR and the structural and wave conditions of the tested perforated and slotted wall with one, two and three chambers. The output variable is the coefficient of reflection

(CR) and the input variables are the wave conditions (H, L, h) measured in wave flume and the structure variables (B and porosity) for each model.

The results given below only refer to the 2-chamber slotted wall caisson. Similar analysis processes and results have been obtained to all other typologies. The relationship between CR and the dimensionless input variables B/L, H/L, H/h, P1 and P2 was modeled by the NN model shown below (Fig. 9). 307 experimental test results were used during the learning phase of NN model and 73 experimental tests were used as testing tests. The range of variables is presented in Table 1.

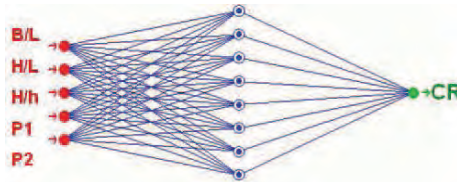


Figure 9. NN model to the 2-chamber caisson with slotted wall.

	B/L	H/L	H/h	Porosity (p)
max	1.048	0.088	0.469	0.4/0.3
min	0.103	0.003	0.037	0.3/0.2

Table 1. Range of variables for NN model of 2-chamber caisson with slotted wall

The relative mean squared error (MSE/Var) was lower than 6% (Fig. 10). Therefore, the NN model for the 2-chamber caisson with slotted wall can be considered a reasonable model to estimate the CR corresponding to this typology.

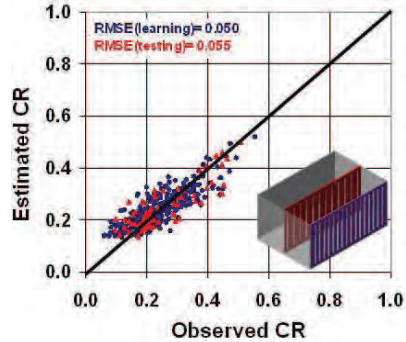


Figure 10. Observed and NN-Estimated CR for 2-chamber caisson with slotted wall.

NN models can be used as simulators (virtual wave flume) in order to provide results corresponding to virtual experiments. The NN model of 1-chamber caisson with slotted wall was used as a simulator to provide an estimation of the reflection breakwater performance. The ratio B/L ranged 0 to 1.0; the H/L were fixed to $H/L=0.01, 0.03, 0.05, 0.07$ and 0.09 ; H/h were fixed to $H/h=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 , and porosities were fixed to $\tau=0.2, 0.3, 0.4$. Figure 11 shows results for $H/h=0.4$ and $H/L=0.07$. The results are similar to those obtained by the PROVERBS formula, which depends only on B/L .

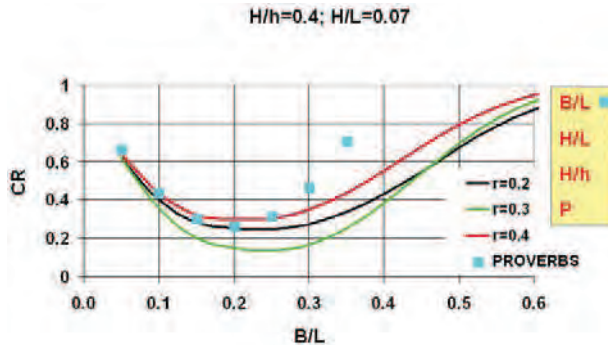


Figure 11. NN estimations of CR for 1-chamber caisson with slotted wall.

Analogously, the NN model of the 2-chamber caisson and the NN model of the 3-chamber caisson with slotted wall were used as a simulator to provide an estimation of the breakwater reflection performance. Figure 12 shows the results for $H/h = 0.4$ and $H/L = 0.07$.

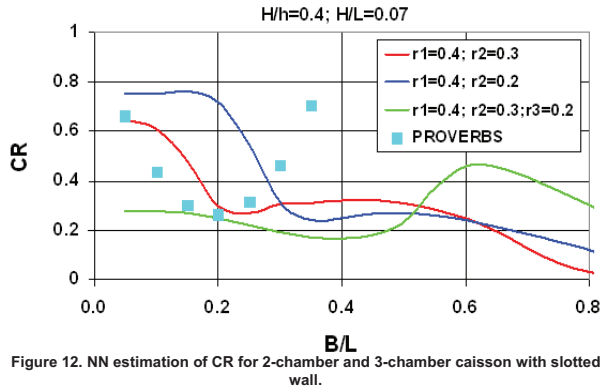


Figure 12. NN estimation of CR for 2-chamber and 3-chamber caisson with slotted wall.

5. CONCLUSIONS

In this paper, CR is measured in a series of experimental tests of different physical models corresponding to the Jarlan-type breakwater. A total number of 1800 regular wave tests and 160 irregular wave tests were carried out for holed and slotted walls. The results obtained from experimental tests are modeled using the MATLAB Neural Network Toolbox and compared to the F&N numerical model. For the 1-chamber scheme, the CR observations are in qualitative agreement to the F&N model, although a clear overestimation of the quantitative CR is noted. The single-chamber scheme shows $CR < 40\%$ in the range $0.1 < B/L < 0.3$, similar to CR estimated by the PROVERBS formula.

The NN methodology to model the nonlinear relationship observed between CR and the structural and wave conditions produced satisfactory results. The NN models for perforated and slotted wall models with one, two and three chambers showed a relative mean squared error (MSE/Var) lower than 6%. Using the NN model as a CR simulator, thousands of virtual laboratory results were obtained and analyzed in order to define the breakwater reflection performance; it can be pointed out that CR is highly dependent on the porosity of third wall in the 3-chamber scheme.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Spanish Ministry of Science and Technology through grant MUDIVAR REN2002-02951. The authors wish to acknowledge the assistance of Cristina Pellejero and Dieter Vanneste in collecting and analyzing the laboratory data.

REFERENCES

- Bergmann, H. et al. (2000) "Wave loads on perforated caisson breakwaters". Proc. Coastal Engineering, 2, pp. 1622-1635.
- Dhinakaran, G. et al. (2002) "Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves". Ocean Engineering, 29, pp. 1981-2004.
- Fugazza, M. and Natale L. (1992) "Hydraulic performance of perforated breakwater". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE 118, pp. 1-14.
- Jarlan, G.E.(1961) "A perforated vertical breakwater". The Dock and Harbour Authority, Vol. 41 n°486, pp. 394-398.
- Jarlan, G.E. (1965) "The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures". Quart. Bulletin, National Research Council Canada, pp. 23-64.
- Jianyi, W. (1992) "Experimental study of perforated caisson breakwaters". China Ocean Engineering, 6, pp. 65-78.
- Kakuno, S., Tsujimoto, G. and Shiozaki, Y. (2003), "A design method for double slit-wall breakwaters". Coastal structures 2003, pp. 295-304.
- Kondo, H. (1979) "Analysis of breakwaters having two porous walls". Proc. Coastal Structures 1979, Vol. 2, pp. 962-977.
- Liberatore, L. (1974) "Experimental investigation on wave-induced forces on Jarlan-type perforated breakwaters". Atti. Del XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, Italy, pp. 101-109.
- Marks, W. and Jarlan, G.E. (1968) "Experimental studies on a fixed perforated breakwaters". Coastal Engineering, 68, pp. 1121-1140.
- Medina, J.R. (1999) "Neural network modeling of runup and overtopping". Coastal Structures'99. Vol. 1, pp. 421-429. A.A. Balkema.
- Medina, J.R., (2001) "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 127, pp. 213-221.
- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M. and De Rouck, J. (2002) "Overtopping analysis using neural networks". Proc. ICCE 2002, ASCE, pp. 2165-2177.
- Medina, J.R. y Serrano-Hidalgo, O. (2004) "Interpolation of Time Series of Sea State Variables Using Neural Networks". Proc. ICCE 2004, pp. 985-996
- Moody, J.E. (1992) "The effective number of parameters: An analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems". In J.E. Moody, S.J. Hanson and R.P. Lippmann (eds.), *Advances in Neural*

- Information Processing Systems 4*, pp. 847-854. San Mateo California: Morgan Kaufmann Publishers.
- Sawaragi, T. and Igwata, K. (1979) "Irregular wave attenuation of a vertical breakwater with two air chambers". *Coastal Engineering in Japan*, 21, pp. 63-74.
- Suh, K.D., Park W.S. (1995) "Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters". *Coastal Engineering* 26, pp. 177-193.
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003) "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson". *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Volume 129, Issue 1, pp. 34-40.
- Takahashi, S., (1996) "Design of vertical breakwaters". Reference Document, No. 34, Port and Harbour Research Institute, 85 p.
- Takahashi, S. et al. (2002) "Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations". *Proc. ICCE 2002, ASCE*, pp. 1365-1376.
- Van Gent, M.R.A. and Van den Boogaard H.F.P. (1998) "Neural network and numerical modelling of forces on vertical structures". *Proc. ICCE'98, ASCE*, pp. 2096-2109.

STUDY OF REFLECTION OF NEW LOW-REFLECTIVITY QUAY WALL CAISSON

Joaquín M. GARRIDO¹, Daniel PONCE DE LEÓN¹, Antonio BERRUGUETE¹, Silvia MARTÍNEZ², José MANUEL², Lisardo FORT², Diego YAGÜE², Jose A. GONZÁLEZ-ESCRIVÁ³ and Josep R. MEDINA³

This paper presents a new low-reflectivity quay wall caisson based on the formation of cell circuits. The cell circuit lengths can be adapted to the specific wave climate conditions at the construction site to obtain the best performance. Results from physical model tests of conventional and cell circuit caissons are described, as well as the construction process and steel reinforcement, which turns out to be quite similar to highly reflective conventional caissons. Neural Network (NN) models are used to describe the nonlinear relationship observed between experimental coefficients of reflection (CR) and the structural and wave conditions for the new low reflectivity quay wall caisson.

Keywords: perforated breakwaters, wave reflection, neural network, caisson, low-reflectivity, quay wall.

INTRODUCTION

The construction of caissons for vertical breakwaters and quays on the Spanish coast has increased dramatically over the last decade. The overexploitation of coastal quarries and environmental constraints associated with conventional mound breakwaters has favored the expansion of the Spanish fleet of floating docks for constructing floating caissons. Caisson-type vertical breakwaters have construction and environmental advantages over conventional mound breakwaters as well as some drawbacks, such as wave reflection. Wave reflection on quay walls increases harbor disturbance and reduces operational time in commercial seaports. In an effort to increase operability, the reduction of wave reflectivity on quay walls is a goal for designers and port planners in many coastal areas. Prefabricated floating caissons with squared or circular cells are the basic construction element for quay walls in Spanish commercial ports. Therefore, the study of new typologies of low-reflectivity vertical breakwaters and quay walls is an important topic for further research; the study of reflection performance of such structures is necessary for design. Furthermore, low-reflectivity structures are being adopted because their energy absorption capacity provides greater hydraulic stability, reduces scour problems and prevents impulsive forces (Takahashi and Hosoyamada, 1994).

Existing designs for low-reflectivity caissons include: (1) specific designs based on patents or ideas that turn out to be very costly to put into practice and (2) designs based on cutting windows on conventional caisson cells with diamond wire. The latter is the most common solution to reduce wave reflectivity in Spanish seaports (see Fig. 1).



Figure 1.- Construction of wave-dissipating chambers, (a) circular cells and (b) diamond wire cut.

Most low-reflectivity structures are designed after a low-reflectivity structural concept given by Jarlan (1961), which is based on a perforated wall and a wave-energy dissipating chamber.

¹ Iberport Consulting S.A., C/Botiguers N° 3 Planta 3 Puertas AB, Parque Empresarial Táctica, 46980 Paterna (Valencia), SPAIN

² Cyes construction company, C/J.J. Dominé n° 6 Pta.5 CP 46011 Valencia, SPAIN

³ Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, SPAIN

First, the wave reaches the front-facing perforated wall; then it is partly reflected and partly transmitted through the perforated wall into the inner chamber. In the chamber, the transmitted wave reflects off of the impermeable back wall and is transmitted through the perforated wall; this wave interferes with the first reflection, attenuating the wave energy. Wave-energy dissipation is also achieved by turbulence within the chamber and flow viscosity passing through wall perforations. In the case of a single chamber, attenuation of wave reflection mainly depends on wave period (T) and distance (B) between the perforated front wall and back wall. The highest energy loss will occur when induced water speed on the perforated wall is maximum; in this case the chamber width is about a quarter of the wavelength (L) inside the chamber ($B = L / 4$). For low water speed, the energy loss is low and a perforated chamber wall is inefficient ($B = L/2$). There is an optimum chamber width and perforated wall porosity to achieve the minimum wave reflection.

Jarlan's concept, referred to above, may be used to create multi-chamber low-reflectivity structures. In this case, not one but several perforated walls make the reflection-transmission scheme more complex. In addition, the depths inside and outside of the chambers may be different and the different wall perforations and wave characteristics makes the study of flow behavior for this type of structure very complex.

Additional technical difficulty is introduced if one aims to reduce the wave reflection of the caisson without significantly affecting caisson manufacturing procedures, schedules and costs. A good design requires not only laboratory testing of low-reflectivity structures, but also detailed engineering and specific casting solutions to solve numerous design and construction problems. There are many problems involved with the design process of anchoring a caisson at the construction site that need to be solved: steel concrete reinforcing, prefabrication process, the casting system and navigation, etc. The CADIMA Research Project aims to design a new low-reflective prefabricated floating caisson structure without significantly affecting the construction cost and manufacturing schedule of conventional floating caissons (see Fig. 1). As a result, a low-reflective floating caisson design was found to compete with conventional caissons in terms of both costs and the tight manufacturing schedules.

In this paper, coefficient of reflection (CR) is analyzed for small-scale models of different typologies of the Jarlan-type structures (see Jarlan, 1961) in comparison to new low-reflectivity quay wall caissons using long cell circuits.

A NEW LOW-REFLECTIVITY CAISSON

Previous studies

The seminal idea of a low-reflectivity structure was given by Jarlan (1961, 1965). Other low-reflectivity designs, similar to the original idea, have been proposed in Japan (Takahashi, 1996), in Italy (Franco, 1994) and Spain (Esteban and Llamas, 2007). Perforated wall caissons are the most widely used solutions for low-reflectivity vertical structures. Typically, perforated walls may have vertical or horizontal slots as well as circular or rectangular holes. Wall porosity is defined as the relation between the perforated area and total area of the wall; wall porosity is usually between 15% and 40% and the width of the chamber (B) is between 1/10 and 1/4 of the local wave length in the basin. Despite the variety of typologies and the growing use of low-reflective structures, knowledge about complex hydraulic behavior and hydrodynamic forces is very limited.

Jarlan (1961) tested at 1/30 scale, a caisson with a perforated front wall with holes and a porosity of 49%. He concluded that the reduction of wave reflection was significant for certain values of wavelength. Marks and Jarlan (1968) included tests with irregular waves to study the forces on perforated structures. Jianyi (1992) tested a drilled type vertical caisson breakwater with advantages of low CR and decreased wave agitation. Bergmann et al. (2000) compared results of wave reflection in single and multiple chamber caisson docks and found a reduction in force on the structure for a wider range of frequencies than a single chamber. Dhinakaran et al. (2002) carried out physical tests to study the hydraulic behavior and the pressures of a typology consisting of a mixed semicircular caisson over a rubble mound bedding-layer with small horizontal forces compared with the vertical breakwater. Tabet-Aoul and Lambert (2003) conducted tests within the European PROVERBS research project and proposed an empirical

method to calculate maximum horizontal forces from the results of those tests and additional data from prototype observations. Recent physical experiments on Jarlan-type breakwaters were carried out by Garrido and Medina (2006, 2007) and Martinez et al.(2010). Relative chamber width, being optimal at $B/L = 0.2$, was the most critical parameter. For low-reflectivity Jarlan-type breakwaters, the relative chamber width is most effective when $0.1 < B/L < 0.3$ for single-chamber, and $B/L > 0.1$ for double-chamber schemes, with porosities lower than 50%. For low-reflectivity Jarlan-type breakwaters, the relative chamber width is the most effective solution when it is $0.1 < B/L < 0.3$ for single-chamber and $B/L > 0.1$ for double-chamber schemes, both cases with porosities lower than 50%.

A variety of theoretical models have also been developed. Jarlan (1965), Kondo (1979), Hagiwara (1984), Fugazza and Natale (1992), Suh and Park (1995), Takahashi et al. (2002), Kakuno et al. (2003), have conducted studies for the calculation of CR on low-reflectivity vertical breakwaters.

At the conclusion of all of these studies it was found that the effectiveness of low-reflectivity structures, related to the dimensionless parameter B/L , is conditioned by construction restrictions and execution costs, because it is usually not possible to achieve the desired chamber width (B) necessary to reduce the CR.

New low-reflectivity design

The new concept of a multi-cell circuit scheme has been proposed as especially effective in reducing wave reflection of low-frequency waves (Medina et al., 2009).

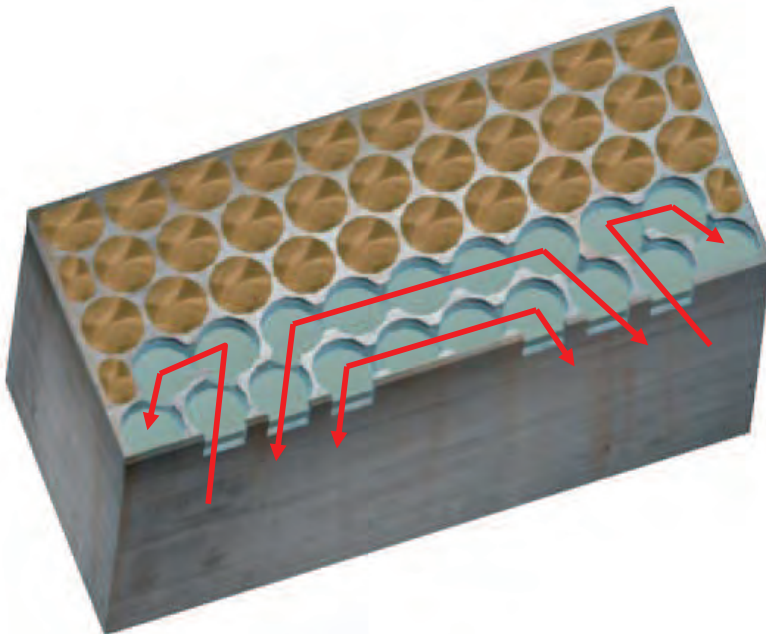


Figure 2.- New low-reflectivity caisson type.

The basic idea of the multi-cell circuit scheme (Fig. 2) is to connect caisson cells in two different directions to form cell circuits with the adequate length to attenuate the incident waves at the construction site. The cell circuits may be long enough to efficiently attenuate long waves and to optimize caisson performance under low-frequency incident waves. Instead of caisson

performance being conditioned by the width of the anti-reflective zone, which is fixed in most cases, a caisson can be designed to be especially efficient in reducing wave reflection of a given spectral bandwidth, including very low-frequency waves. As an extreme case, the multi-cell circuit scheme can be used to form multiple chambers, as long as $L_c > 100$ meters, to attenuate very low-frequency waves which may cause resonance problems in the inner part of a harbor. For the most common application, the multi-cell circuit scheme may be adapted to obtain a caisson especially efficient in reducing wave-reflection for a specific frequency band. Therefore, instead of one design-fits-all strategy of many low-reflective structures, the multi-cell circuits concept can be adapted to obtain the maximum efficiency in wave reflection reduction for specific caissons in a given harbor zone. It is necessary to take into consideration that incident waves on the caissons, the reflection of which must be attenuated, have different frequencies in different harbor areas.

In order to verify the effectiveness and feasibility of this new low-reflectivity caisson, wave frequencies were classified in three categories: very high ($f[\text{Hz}] > 0.2$), high ($0.2 < f[\text{Hz}] < 0.1$) and low ($f[\text{Hz}] < 0.1$). Constructive constraints were taken into consideration for the manufacturing system of floating docks and pontoons, modifications of formwork sliding procedures, steel concrete reinforcement, flotation properties, towing process and navigability, anchoring procedure and superstructure execution. Both equipment and manufacturing procedures must be adapted to produce these economically-efficient low-reflectivity caissons.

PHYSICAL MODEL TESTS

Small-scale physical experiments were conducted in the wave flume of the *Universidad Politécnica de Valencia* (UPV) to investigate the reflection behavior of several perforated-wall breakwater caisson models. The UPV wave flume is 30.0 meters long, 1.2 meters wide and 1.2 meters deep; it is equipped with a piston wave generator with AWACS active wave absorption system.

Fig. 3 and Fig. 4 show the cross section and front view of the anti-reflective caisson model. First, a series of physical 1/35 scale experiments were carried out to compare wave reflection performance of a typical Mediterranean conventional circular cell caisson (M0: 36.9m x 15.7m x 17.0m) with three low-reflective caissons (M1, M2 and M3). M1 ($d_c[\text{m}] = 1.0$) and M2 ($d_c[\text{m}] = 2.0$) are Jarlan-type caisson models. M3 (Fig. 5) is a low-reflectivity multi-cell circuit caisson (window dimensions $[\text{m}] = 2.6 \times 2.0$).

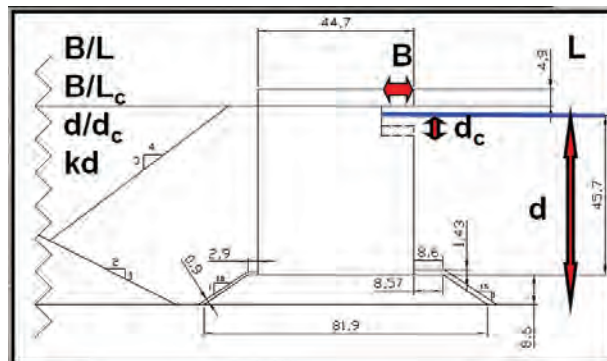


Figure 3.- Cross section of anti-reflective caissons tested in wave flume (dimensions in cm.)



Figure 4.- Front view of new low-reflectivity caisson model (scale 1:35)



Figure 5.- Low-reflectivity multi-cell circuit caisson model M3

Tests with regular and irregular waves were carried out with wave trains at very-high-frequency ($f[\text{Hz}] > 0.2$), high-frequency ($0.2 < f[\text{Hz}] < 0.1$) and low-frequency ($f[\text{Hz}] < 0.1$), considering an incident wave height $H[\text{m}] = 1.0$ at prototype scale. The incident and reflected waves were analyzed using the time-domain LASA method (Medina 2001), which is able to separate nonlinear incident and reflected waves in non-stationary conditions.

ANALYSIS OF RESULTS

The neural network methodology with pruned neural networks (NN) used by Medina et al. (2002) was used to model the nonlinear relationship observed between CR and the structural and wave conditions. Pruned NN models by Evolutionary Strategies can be considered multi-parametric nonlinear regression methods which are able to capture hidden complex nonlinear relationships between input and output variables. This methodology has been used to select

significant variables and to analyze and compare results. Eighty percent of the data were randomly selected for training and 20% for testing. The NN model validation criterion depended on the similitude between the mean squared error (MSE) for training and testing data. It has been found that both B/L_{01} and B/L_{01c} described the observed results satisfactorily, where B is the width of anti-reflective zone, L_{01} is the wave length in the basin and L_{01c} is the wave length inside the caisson cell. Fig. 6 compares the reflected energy percentage (%ER) observed and estimated by the NN models and Figure 7 shows %ER as function of B/L , for M1, M2 and M3 low-reflectivity caissons.

The reflected energy percentage ($\%ER=CR^2$) is used to compare reflection performance from models M1, M2 and M3. The experimental data range were $0.06 < d_c/d < 0.15$, $0.13 < kd < 8.85$ y $0.03 < B/L_{01c} < 0.71$, in which d and d_c are the water depths at wave basin and chamber respectively and $k=2\pi/L_{01}$ is the wave number corresponding to wave length at wave basin, $B[m]=7.0$.

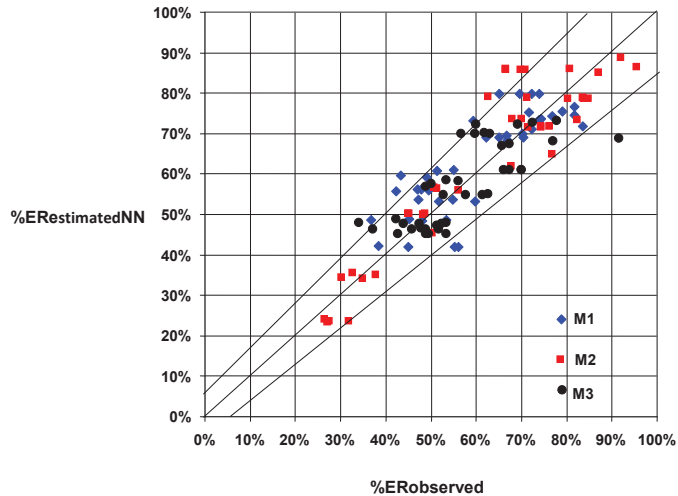


Figure 6.- %ER observed versus %ER estimated by NN model

As a result, it is found that the low-reflective caissons with deeper cells (M2) are more effective than caissons with shallow cells (M1) for high-frequency waves, but they are less effective for very-high-frequency waves. The multi-cell circuits model (M3) is more effective for low-frequency waves (Fig. 6).

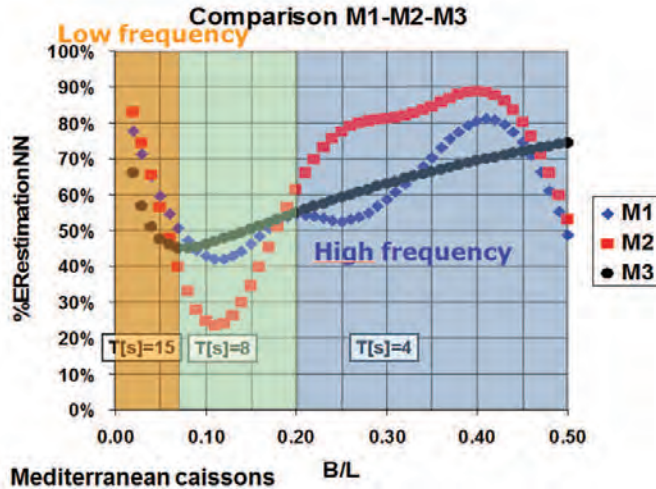


Figure 7.- %ER(B/L) for caissons M1, M2 and M3

CONSTRUCTION FEASIBILITY

The construction feasibility of window-type openings in caisson cells was tested at prototype scale with satisfactory results using the CYES caisson production facility. Caissons were manufactured, floated-out, towed, sunk and placed in the Northern Breakwater Extension of the Port of Valencia. Figure 8 shows the prototype scale “stadium caisson” photographs where outer windows are pointed out. In addition to construction effectiveness, the methodology used provided robust structural performance and durability with minor increase in execution periods and costs.



Figure 8.- CYES floating dock facility

Construction solutions were tested at prototype scale, such as special inner formwork and outer windows, towing, sinking and placement. Figure 9 shows the sealed pieces used during the building of the windows to avoid concrete leakage during the pouring procedure.



Figure 9.- Sealed pieces and cover protection for towing in manufacturing caisson process



Figure 10.- Cap used for closing external windows in caisson.

Figure 10 shows the cap used for closing external windows. Figure 11 shows part of the cover protection piece fixed in the towing process, which can be used as a support surface to construct the superstructure. Most construction procedures are similar to those of conventional caissons.



Figure 11.- Superstructure execution over quay wall caisson

Finally, the new multi-cell low-reflectivity caisson was dimensioned using an FEM numerical model to provide the proper steel reinforcement to assure caisson resistance during construction and service. The optimum reinforcement was previously determined and the increase in steel consumption was not relevant compared to a conventional fully-reflective caisson. Figure 12 shows the reinforcement graph corresponding to the multi-cell circuit caisson (M3 model).

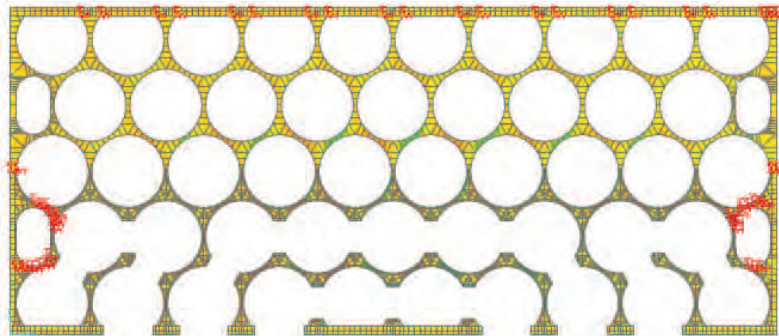


Figure 12.- Steel reinforcement and stress map of a multi-cell circuit caisson

CONCLUSIONS

A new concept of multi-cell circuit scheme is considered to be especially effective in reducing low-frequency wave reflection. The basic idea of the multi-cell circuit scheme is to connect caisson cells in two directions to create circuits of sufficient length and also to optimize the given response to low-frequency incident waves. Instead of having a caisson's performance conditioned by the anti-reflective zone width, fixed in most cases, caissons can be designed to be especially efficient for a given spectral bandwidth including very-low-frequency waves. Hydrodynamic, dimensioning and construction criteria were established for the wave frequencies ranges: very high ($f[\text{Hz}] > 0.2$), high ($0.2 < f[\text{Hz}] < 0.1$) and low ($f[\text{Hz}] < 0.1$), with an incident wave height $H[\text{m}] = 1.0$.

A new low-reflective vertical caisson using the multi-cell circuit concept was designed and tested in the 2D wave flume in the Laboratory of Ports and Coasts at the UPV. The result of the small scale physical laboratory tests provided a comparison between different typologies of the Jarlan-type breakwater and the new low-reflective caisson. As a result, it was found that the low-reflective caissons with deeper cells are more effective than caissons with shallow cells for high-frequency waves, but they are less effective for very-high-frequency waves; multi-cell circuits are also more effective for low-frequency-waves.

Construction design was considered in terms of manufacturing systems on floating docks, sliding forms adjustment, reinforcement, flotation, navigability, anchor procedure and superstructure. Both equipment and manufacturing procedures were adapted to produce economically-competitive low-reflectivity caissons were tested in the prototype.

It can be concluded that the new low-reflectivity prefabricated floating caisson has achieved a balance in terms of reflectivity reduction, cost, manufacturing time and feasibility in comparison with Jarlan-type breakwaters.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to acknowledge Spanish Ministerio de Fomento for the partial funding of the CADIMA research project. The authors thank the Valencia Port Authority for logistic support for the constructability tests at the new breakwater. The authors also thank Guillermo Zarranz, Enrique Ripoll and César Moreno for assisting with the laboratory tests and Lia Wallon for revising the manuscript.

REFERENCES

- Bergmann, H., and H. Omeraci. 2000. Wave loads on perforated caisson breakwaters, *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1622-1635.
- Dhinakaran, G., V. Sundar, R. Sundaravidevelu, and K.U. Graw. 2002. Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves, *Ocean Engineering*, 29, 1981-2004.
- Esteban, F., and R. Llamas. 2007. *Estructura de baja reflexión*. Patente de invención nº 2262405. Oficina española de patentes y marcas (in Spanish).
- Franco, L. 1994. Vertical breakwaters: the Italian experience, *Coastal Engineering*, 22, 31-55.
- Fugazza M., and L. Natale. 1992. Hydraulic performance of perforated breakwater, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, 118, 1-14.
- Garrido, J.M., and J.R. Medina. 2006. Study of Reflection of Perforated Vertical Breakwaters, *Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 2165-2177.
- Garrido, J.M., and J.R. Medina. 2007. Modelo Neuronal para Estimar la Reflexión del Oleaje en Diques Verticales Antirreflejantes. *Libro de Ponencias de las IX Jornadas Españolas de Costas y Puertos*, AZTI-Tecnalia, 486-495 (in Spanish).
- Hagiwara K. 1984. Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation, *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 2810-2826.
- Jarlan, G.E. 1961. A perforated vertical breakwater, *The Dock and Harbour Authority*, 41(486), 394-398.
- Jarlan, G.E. 1965. The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures, *Quarterly Bulletin, National Research Council Canada*, 23-64.
- Jianyi, W. 1992. Experimental study of perforated caisson breakwater, *China Ocean Engineering*, 6, 65-78.
- Kakuno S., G. Tsujimoto, and Y. Shiozaki. 2003. A design method for double slit-wall breakwaters, *Proceedings of the International Conference on Coastal Structures 2003*, ASCE, 295-304.
- Kondo H. 1979. Analysis of breakwaters having two porous walls, *Proceedings of the International Conference on Coastal Structures 1979*, 962-977.
- Marks, W., and G.E. Jarlan. 1968. Experimental studies on a fixed perforated breakwater, *Proceedings of the 11th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1121-1140.
- Martinez, S., J. Manuel, D. Yagüe, J.M. Garrido, D. Ponce de León, A. Berruguete, J.A. González-Escrivá, and J.R. Medina. 2010. Designing a new low-reflectivity quay wall caisson. *Proceedings of the PIANC MMX Congress Liverpool*, paper N. 146.

- Medina, J.R. 2001. Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, 127, 213-221.
- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M. and De Rouck, J. 2002. "Overtopping analysis using neural networks". Proc. ICCE 2002, ASCE, pp. 2165-2177.
- Medina, J.R., J.A. González-Escrivá, L. Fort, S. Martínez, C. Dolores, D. Ponce de León, J. Manuel, D. Yagüe, J.M. Garrido, and A. Berruguete. 2009. *Estructura Marítima Vertical con Cámaras de Unidades Múltiples para la Atenuación de la Reflexión de Oleaje*. Patent ES200931049 presented at Spanish Patent Office (in Spanish).
- Suh, K.D., and W.S. Park. 1995. Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters, *Coastal Engineering*, 26, 177-193.
- Tabet-Aoul, E., and E. Lambert. 2003. Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129, 34-40.
- Takahashi S., and S. Hosoyamada. 1994. Hydrodynamic characteristics of sloping-top caissons, *Proceedings of International Conference on Hydro-technical Engineering for Port and Harbour Construction*, PHRI, 1994.
- Takahashi, S., 1996. *Design of vertical breakwater, Reference Document, No. 34*, Port and Harbour Research Institute.
- Takahashi, S., Y. Kotake, R. Fujiwara, and M. Isobe. 2002. Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations, *Proceedings of the 28th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 1365-1376.

DESIGNING A NEW LOW-REFLECTIVITY QUAY WALL CAISSON

by

S. Martínez¹, J. Manuel, D. Yagüe, Cyes Construction Company (Spain)
J.M. Garrido², D. Ponce de León, A. Berruguete, Iberport Consulting (Valencia)(Spain)
J.A. González-Escrivá and J.R. Medina³, Universidad Politécnica de Valencia (Spain)

ABSTRACT

Wave reflection on quay wall increases harbour disturbance and reduces operation time in commercial seaports. In an effort to increase operability, the reduction of wave reflectivity on quay walls is a goal for designers and port planners in many coastal areas. Prefabricated floating caissons with squared or circular cells are the basic construction element for quay walls in Spanish commercial ports. Existing solutions for low-reflectivity caissons include: (a) specific solutions based on patents or design ideas that turn out to be very costly to put into practice and (b) Jarlan's type solutions cutting windows on conventional caisson cells with diamond thread; the latter is the most common solution to reduce wave caisson reflectivity in Spanish seaports. These conventional solutions have an empty chamber on the upper part of the caisson having an optimum performance when the wavelength in the chamber is about four times the chamber width; however, the attenuation of wave reflection is poor for much longer wavelengths. To improve the anti-reflective performance for low-frequency waves, a new concept based on the formation of long cell circuits is presented. The cell circuits can be adapted to the specific wave requirements of the caisson to obtain the best performance. Results from physical model tests of conventional and cell circuits caisson are described as well as construction process and steel reinforcement which turns out to be quite similar to highly reflective conventional caissons.

1. INTRODUCTION

Rubble mound breakwater is the most common construction typology in the Spanish coast. However, during the last two decades, the construction environmental impact constraints as well as the new quarries environmental requirements have reduced the supply of large volume of materials demanded by mound breakwaters versus the vertical breakwater typology. Furthermore, a significant increase of international trade and maritime transport during the last two decades has extended the Spanish ports, which have been demanding larger land space and deeper waters. Result of this situation in Spain has turned out on a tremendous construction boom of docks and piers executed by mean of prefabricated caissons as a vertical wall. Nowadays, it is a fact that both Spanish Port Administration and Spanish Construction Industry have been clearly betting for years on the type of docks and piers made of prefabricated caissons. Nevertheless and in spite of many advantages of caissons for quays and breakwaters, this vertical solution has the disadvantage of its high reflectivity, which may significantly increase harbor disturbance and consequently reduce port functionality. Therefore, designers has felt obligated to improve the behavior of such structures, especially directed to decrease the reflectivity which may reduce the negative effects of local erosion on coastal dynamics and on navigation, increasing stability and reducing overtopping rates for breakwaters and reducing harbor agitation for quay walls within the harbor.

Vertical caisson solution type has many environmental and building advantages versus mound breakwater, such as space use, material economizing, work process reduction, vessel mooring use at the harbor side, process industrialization, low environmental impact during construction, etc. However, vertical breakwater impermeable wall can make multiple problems associated with high reflectivity and corresponding operational problems, increase of forces on the structure, local erosion, etc. In order to reduce reflection effect on docks and piers, special designs for low-reflectivity have been developed for vertical breakwaters and quays. Most of them have hollowed out chambers that allow water entrance through holes in the walls. This type of structures is being adopted because its energy absorption capacity provides greater stability and reduces scour problems and prevents impulsive forces (Takahashi and Hosoyamada, 1994).

Despite all different types and the increasing use of these structures, knowledge of its complex hydraulic behavior and hydrodynamic forces required for its design is limited. Most of low-reflectivity structures are based on energy dissipative chambers principle perforated on walls (see Jarlan, 1961).

¹smartinez@cyes.es, ²igarrido@iberport.com, ³jrmedina@upv.es

These chambers are hit by the wave impact which is partly reflected in the first front-facing perforated wall and then partially transmitted through the structure chamber or chambers and consequently be reflected back interfering the first reflection in the structure. Power dissipation is achieved by turbulence produced by wave interference and also due to flow viscosity passing through wall perforations. In case of a single chamber, reflection attenuation mainly depends on wave period (T) and distance (B) between facing perforated front and back wall. The highest loss energy will occur when induced speed by waves on the wall is maximum in the perforated wall; in this case scenario chamber width is about a quarter of the wavelength (L) inside the chamber ($B = L / 4$). In the other hand, for low speed, the energy loss is poor and perforated chamber wall is inefficient ($B = L / 2$). There is an optimum chamber width and perforated wall porosity to achieve minimum reflection. Moreover, there is an energy dissipation effect inside the chamber caused by other factors such as the water jets interaction from the openings on the wall with the water stored in the chamber and turbulence effects. It could be considered depth effect between inside and outside of the chamber as a cause which produces energy dissipation. All before mentioned issues, and many variables involved in the process both geometric and wave characteristics, makes the study of flow behavior for this type of offshore structure very complex.

A new low-reflective design for caissons which allow the attenuation of low frequency waves is presented. Design not only limited to laboratory test of anti-reflective concept but also detailed engineering and specific casting construction solutions have been obtained to solve the numerous aspects in order to anchor a caisson on place (reinforcing steel, prefabrication process, special casting system, navigation, etc). Reduction of caisson reflectivity to critical wave period ranges will reduce harbor agitation and increase harbor operation time. Figure 1 shows typical cross section of Spanish Mediterranean quay wall caisson, Figure 2 shows CYES floating dock and forms for circular cells caisson and Figure 3 shows conventional caisson applications used for vertical breakwaters (a) and quay walls (b).

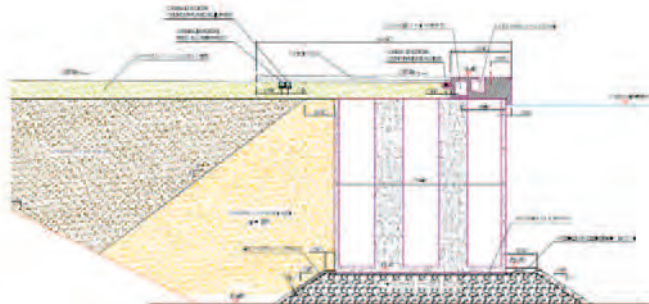


Figure 1: Cross section of conventional quay wall caisson



Figure 2: Floating dock and caisson fabrication in CYES installation



Figure 3: Conventional use of reflective caissons at Sagunto Port

2. Conventional Low-reflective caissons

Low reflective caissons for Valencia Port are a typical example of a wave reflection attenuation quay for a Spanish harbor. During the years 2006-2007, the CYES construction company executed as a part of a Joint Venture "Valencia Port Outer Dock Mooring Distribution" to serve the 32nd America's Cup 2007 Celebrated in Valencia (Spain). Team bases were installed inside the Dock and the exit of the contestant teams was taking place across a new Northern Entrance through a channel excavated in dry in a record time. Figure 4a shows a view of Valencia Port in 2006 with the new harbour entrance on the left side. Figure 4b shows the area during landfill execution of the six caissons that constitute the access to floating pontoons.



Figure 4: New Northern Entrance to Valencia Port.

To avoid multi-reflection problems in the new Northern Entrance navigation channel, a solution based on anti-reflective BARA blocks was constructed for the inner part of the channel. In order to continue with the low-reflectivity characteristic of the navigation channel, anti-reflectivity quay wall caissons were placed in the outer part. Figure 5 shows the cross section of the structure: several chambers were opened in conventional caisson (Jarlan's type scheme) for reducing wave reflectivity of high frequency ship waves making easier navigation along Northern Entrance's channel.

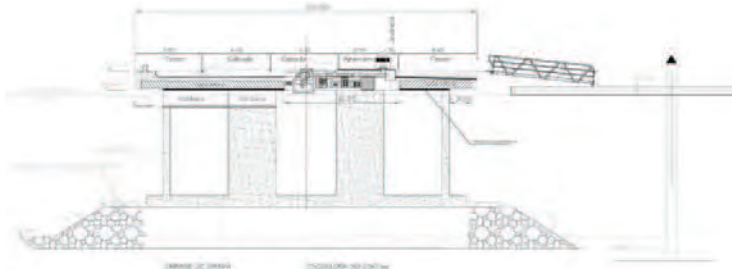


Figure 5: Anti-reflective caisson cross section at Valencia Port Northern Entrance.

Main execution phases for the above mentioned low-reflectivity quay wall were:

1. Conventional caissons circular cells manufacture by mean of CYES-floating dock.
2. Foundation bed layer by maritime equipment.
3. Caissons towing and anchorage at construction site.
4. Caisson cells sand filling.
5. Dry openings of second cells row: inner material removal, wall cut by disc, rockfilling and concrete cover placement.
6. Front cells openings: similar as stage 5 but cutting perform by diamond thread instead of disc.
7. Superstructure construction: levelling and supports execution, transverse beams, longitudinal prefabricated slabs, and "in situ" slab.
8. Equipments installation

Preliminary conclusions about execution process were:

- a. Cells openings are created by cutting reinforced concrete walls, which is not desirable at any new construction. It induces negative effects on the quality material and concerns about structure durability and life expectancy which demands higher costs of monitoring and maintenance during service lifetime.
- b. Reinforced concrete cutting is a very slow and critical activity that caused significant delays in construction phase.
- c. Superstructure had to be specific and designed on a given purpose; tensional distribution is different as well as the external beam.
- d. There are some Spanish experiences on cutting reinforced concrete to make openings in caissons but the existing literature and the previous experiences are very scarce.
- e. It became evident that openings should have been made during caissons manufacture although some special casting elements, taps and procedures should be designed to solve the complete fabrication process, and also caissons tow and anchor manoeuvring.

Construction schedule for Valencia 2007 America's Cup imposed very short execution periods which forced to use the relatively well known cutting techniques to make caissons less reflective against short waves. Table 1 shows schedule constrains during Valencia 2007 America's Cup infrastructure construction. Although specific problem was satisfactorily solved in situ, the general problem for wave reflection attenuation from quay wall caissons could not be solved. General reflection problem is relevant in many applications not only to attenuate ship waves but also storm waves and low frequency waves.

TEAM BASES WORKS	START DATE	END DATE	PERIOD
INNER DOCK CUSTOMS QUAY WIDENING	July 2004	September 2004	3 months
NEW INFRASTRUCTURE WORKS	START DATE	END DATE	PERIOD
NORTHERN NEW PORT ENTRANCE	December 2004	April 2006	17 months
OUTER DOCK MOORING AREA	February 2006	January 2007	12 months
INSTALLATIONS AND PAVEMENTS	September 2006	April 2007	8 months
TOTAL PERIOD			< 3 years

Table 1: Works completion record time in Valencia 2007 America's Cup.

3. Spanish experiences

Prefabricated squared or circular cells caisson for vertical breakwaters and quay walls is a typical element in the Spanish ports, where tens of kilometres of this type of quays have been constructed during the last two decades. It is fully accepted logistic, economic and environmental advantages of vertical caisson structures in deep waters. However, a vertical impermeable wall can cause multiple problems related to their high reflectivity, such as forces increasing against the structure, scour

problems, navigation problems in the neighbourhood, harbour agitation, multi-reflectivity effect and resonance inside the harbour. Therefore, solutions are needed to allow the improvement for reflective behaviour on this kind of structures without significantly changing constructive process and total cost.

There are some Spanish experiences in low-reflectivity caissons field, but they are relatively scarce and mostly based on destructive “cutting wall” techniques: A.P. Almería, A.P. Bahía de Algeciras, A.P. Bilbao, A.P. Santa Cruz de Tenerife, A.P. Las Palmas; A.P. Valencia (2007 America’s Cup), Ports Illes Balears, etc. However, low-reflectivity characteristics are becoming increasingly importance to the Spain Technology, promoting and valuing positively the constructive variants that induce more improvements of this nature than conventional vertical structures. Harbour operation capacity depends on dock disturbance and this phenomenon is reduced by low reflectivity caissons. Thus it turns out that ports functionality, management and economical results can increase and improve significantly. This problem raised for commercial ports is extensible also to small recreational and fishing ports, as well as to navigation channels.

In addition to destructive “cutting wall” solutions using diamond thread to form windows in conventional caisson cells already anchored, there are some special solutions based on specific design ideas, most of them patented, that turn out to be very difficult or costly to put into practice. Figure 6 shows openings cutting wall (phases 5th and 6th) of the low-reflective caissons at Valencia Port.



Figure 6: Cutting wall solution for low-reflective caissons at Valencia Port.

The construction process similar to this shown in Figure 4 to form Jarlan’s chambers with or without rubble mound slope is the most common solution to reduce caissons wave reflectivity in the Spanish harbours, because the high cost of special anti-reflective structures has complicated their use.

MUCAR Research Project was conceived in order to obtain the best design of low-reflective caissons for quay walls and be applicable to the Spanish industrial market, at the same time. Considering both execution costs and reflection performance, MUCAR (see Martínez et al., 2009) focused three simultaneous objectives: constructive feasibility, reflection performance optimization and strength assurance through stresses analysis and steel reinforcement estimation. Firstly, the limits and methods to create openings in caisson cells were defined by experts who also solve related construction problems (casting, towing and anchoring). Secondly, a series of small scale (1/35) laboratory tests were carried out to characterize the reflection performance depending on structural parameters (chamber depth, chamber width, windows widths, etc.) and incident wave conditions (wave period T or T_m , wave height H or H_s , water depth, etc.). Thirdly, detailed engineering was completed which obtains the stresses map from a 3d FEM model to properly define the steel reinforcement for caissons with multiple cells openings. Finally, the execution process was tested successfully in singular caissons at a full prototype scale.

4. A cost-efficient low-reflective caisson

Martínez et al. (2009) describe MUCAR Project which aim was to design a new typology of low-reflectivity quay wall caisson with the following general characteristics referred to conventional high reflective caissons:

1. Minimum wave reflection for prescribed frequency ranges, including low-frequency waves.
2. Adaptability to the specific incident wave conditions of a particular harbour.
3. Robust structural performance and durability
4. Reduction on the increment suffered on manufacture and construction periods.
5. Final cost increase reduction.
6. Systematic use as conventional highly reflective caissons.

Specific phases for MUCAR project were: (a) the state of the art analysis was developed to grasp the most promising alternatives, (b) criteria for design definition, construction and adaptability to existing facilities, (c) selection of alternatives, (d) small scale experiments, (e) steel reinforcement and detail engineering and (f) openings full scale construction test.

Since the implementation in several countries of the original idea proposed by Jarlan (1961, 1965), some designs have been proposed on this concept, especially in Japan (Takahashi, 1996) where they have built crates slot-type, multi-camera, flat, inclined, curved; or in Italy, where perforated dikes have been installed in Porto Torres, Sardinia, Palermo and Sicily (Franco, 1994). Perforated wall caissons are the most widely used solutions for vertical structures; single or multiple breast walls with variable porosity and prefabricated blocks in quays. Typically, walls have vertical and horizontal slots or circular or rectangular holes. Wall porosity is defined as a relation between perforated area and total area of wall; it is usually between 15-40% and the width of the camera (B) is between 1/10 and 1/4 of the local wave length near the vertical structure. Despite the variety of typologies and the growing use of low-reflective structures, knowledge about its complex hydraulic behavior and hydrodynamic forces is limited.

The first important experimental study of low-reflective caisson type structure can be attributed to anti-reflective idea of Jarlan (1961) who tested at 1:30 caisson front wall chamber and perforated with holes and porosity 0.49. He concluded that reduction of reflection was significant for certain values of wavelength. Marks and Jarlan (1968) conducted tests with irregular waves and performed a spectral analysis to study the characteristic of forces. They also noted in perforated walls a significant erosion reduction at the base of the box resting on sandy bottom with regular waves. Jianyi (1992) designed a drilled type vertical caisson breakwater and tested it with regular and irregular waves showing advantages of low coefficient of reflection, absorption of the waves, decreased wave agitation. Bergmann et al. (2000) compared results of reflection in single and multiple chamber caisson docks and found a reduction of forces on the structure for a wider range of frequencies than a single chamber. Dhinakaran et al. (2002) carried out physical tests to study the hydraulic behavior and the pressures of a typology consisting of a mixed semicircular caisson over rubble mound bedding-layer with small horizontal forces compared with the vertical breakwater. Tabet-Aoul and Lambert (2003) conducted tests within the European PROVERBS research project and proposed an empirical method to calculate maximum horizontal forces from the results of the tests and existing data on prototype.

Considering theoretical models, Jarlan (1965) applied sound waves reflection's theory on marine structures. Kondo (1979) presented an analytical approximation to estimate the reflection and transmission coefficient for permeable and impermeable walls pierced with two holes. Hagiwara (1984) proposed a theoretical analysis using the integral equation derived for the unknown components of the horizontal velocity at the permeable wall to estimate reflection coefficient and vertical transmission of dissipative wave structures. He also studied structural and wave characteristics influence on dissipation capacity of a permeable dam on both sides land and sea. Fugazza and Natale (1992) analyzed the wave attenuation caused by a permeable structure and proposed a formula to optimize the hydraulic design of Jarlan dike type. Suh and Park (1995) developed a model to predict reflection coefficient of a perforated vertical breakwater built upon directional swell. Takahashi et al. (2002) applied the VOF numerical method for reflection study in a perforated box. Kakuna et al. (2003) applied a design procedure based on the numerical method BIM (Boundary Integral Method) whose objective was to achieve a reflectance maximum of 40% over a wide range of frequencies through slotted double breast wall design. Suh et al. (2006) describe how to apply the analytical model developed by Suh and Park (1995) to a vertical dam partially perforated and irregular waves.

Garrido and Medina (2006) tested regular and irregular waves for wave reflection studying in low-reflectivity Jarlan's vertical breakwaters using four different porosities and three chambers combinations tested with three different chamber's widths and different openings typologies on wall (round holes and vertical slots). Relative chamber width, being optimal at $B/L = 0.2$, was the most critical parameter. Multiple-chamber scheme and slots ($C_R < 50$) were more effective than single

chamber and round holes walls considering an incident wave height $H[m] = 1.0$ m. For low reflectivity Jarlan type breakwaters, the relative chamber width is the most effective solution when $0.1 < B/L < 0.3$ for single-chamber and $B/L > 0.1$ for double-chamber schemes, both cases with porosities lower than 50%. Figure 7 compares the results of single chamber reflection function of Jarlan's structures with different porosities.

Those experimental results as most of the above referred literature have limited utility for caissons, because feasibility and execution costs impose strict limitations to chambers depth which have to be smaller than harbor wave basin depth. However, the results concluded by Takahashi (1996) and González-Escrivá et al. (2009) indicate that relative wavelength corresponding to chamber depth may be a good alternative to characterize caissons reflection performance formed by permeable cells for small depth.

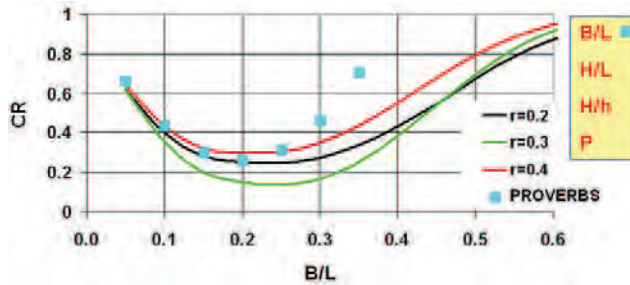


Figure 7- Reflection coefficient in Jarlan's single-chamber quay walls for different porosities.

According to the Spanish Recommendations ROM 0.0, ROM 0.2-90 and ROM 3.1-99, in addition to long waves and harbor resonance problems, storm wind waves propagated to quay wall, local generated wind waves and ship waves affect port operability. Usually, four frequencies categories are established to dissipate wave energy: very high ($f[Hz] > 0.2$), high ($0.2 < f [Hz] < 0.1$), low ($0.1 < f [Hz] < 0.03$) and very low ($f [Hz] < 0.03$). Table 2 shows typical dimensions of quay wall caissons constructed during the last two decades in the Spanish harbors.

Zone	Level					
	Pavement	Beam (low)	Caisson (top)	Caisson(low)	High tide	Low tide
Mediterranean	+2.0 to +3.5	+0.0 to +0.5	+0.5 to +1.8	-15.0 to -17.0	+0.5	+0.0
Atlantic	+4.5 to +6.9	+0.5 to +2.0	+2.0 to +4.0	-10.5 to -20.0	+4.5	+0.0

Table 2- Typical caisson dimensions in Spanish harbors.

Besides constraints imposed by the dimensions given in Table 1, additional constructive constraints are considered for manufacturing system on floating docks and pontoons, sliding forms changes, steel reinforcement, flotation properties, towing process and navigability, anchoring procedure and superstructure execution. Both equipment and manufacturing procedures must be adapted to produce economically-efficient low-reflectivity caissons. Taking into consideration hydrodynamic, design and constructive criteria, some alternatives have been selected for small scale (1/35) physical experimentation for regular and irregular waves. Additionally, a new concept of multi-cell circuit scheme was considered to be especially effective to reduce low frequency wave's reflection. Multi-cell circuit scheme basic idea (see Medina et al., 2009) is to connect caisson cells in two directions to form long enough circuits and also to optimize the given response to low frequency incident waves. Instead of having a caisson which performance is conditioned by the anti-reflective zone width, fixed in most cases, caisson can be designed to be especially efficient to a given spectral bandwidth including very low frequency waves. As an extreme case, the multi-cell circuit scheme can be used to form multi-chambers as long as $L_c = 100$ meters appropriate to attenuate very low frequency waves which may cause resonance problems in inner part of a harbour. For the most common application, the multi-cell circuit scheme may be adapted to obtain a caisson especially efficient for a specific frequency band reduction; therefore, instead of one design-fits-all strategy of many anti-reflective structures, multi-cell circuits can be adapted to obtain maximum efficiency caissons for each harbour zone.

5. Physical model tests

2D small-scale (1/35) model tests were carried out at Ports and Coasts Laboratory of the *Universidad Politécnica de Valencia* (LPC-UPV) comparing conventional quay wall caisson behaviour with multi-cells circuits on low-reflective caisson. The LPC-UPV wave flume is 30.0 meters length, 1.2 meters wide and 1.2 meters deep and it is equipped with a piston wave generator with AWACS active wave absorption. Figure 8 shows a scheme of 2D experiments with wave and pressure sensors positioning and figure 9 shows the cross section for anti-reflective caisson model. The first series of physical 1/35 scale experiments compared wave reflection performance of a typical Mediterranean conventional circular cell caisson (M0: 36.9x15.7x17.0 m.) versus three anti-reflective caissons (M1, M2 and M3). Figure 9 shows the cross section of Jarlan anti-reflective M1 ($h_c[m]=1.0$) and M2($h_c[m]=2.0$) caisson models. Figure 10 shows the M2 model placed inside the LPC-UPV wave flume.

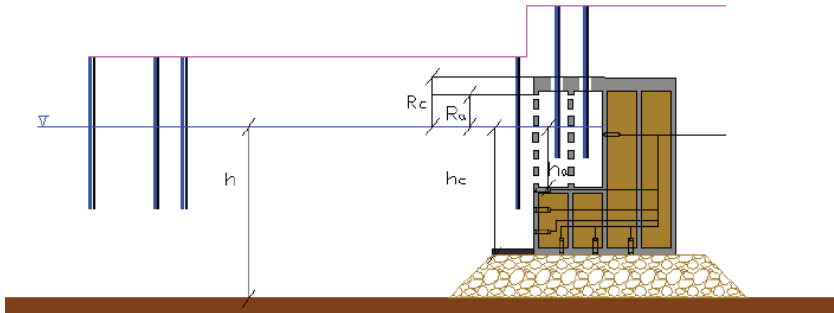


Figure 8: Model and sensors sketch representation located in the LPC-UPV wave flume.

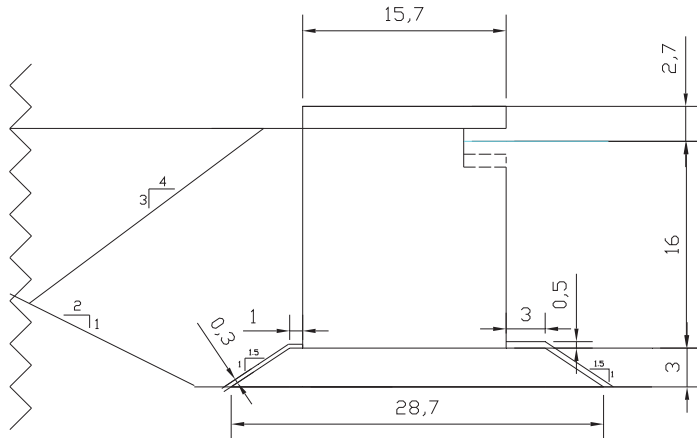


Figure 9: Cross section of anti-reflective caissons tested in wave flume (dimensions in m.)



Figure 10: Anti-reflective caisson model in the wave flume (scale 1:35)

M0 was the impermeable reflective model used to validate reflection coefficients and to measure reference wave pressures. M1 was a low-reflectivity Jarlan type caisson model connecting two cells (dimensions of windows on prototype scale[m]=2.6x2.0). Figure 11a shows the M2 low-reflectivity Jarlan type caisson connecting two cells (window dimensions[m]=2.6x3.0) while M3 low-reflectivity multi-cell circuit caisson (window dimensions[m]=2.6x2.0) is shown in figure 11b.

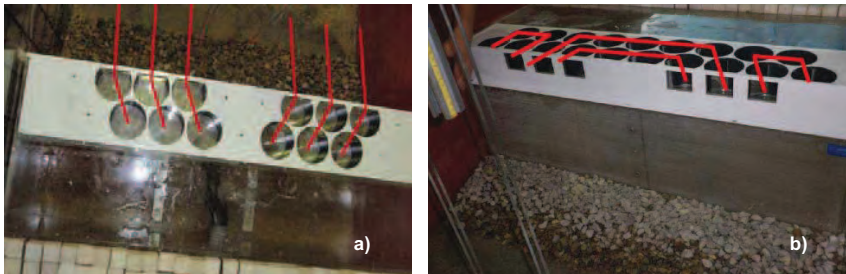


Figure 11: Anti-reflective caissons: (a) Jarlan model M2 and (b) multi-cell circuit model M3

Regular and irregular tests were conducted, although irregular tests are the most realistic ones. 40 irregular tests (JONSWAP [$\gamma=3.3$] with $N=1000$ waves) for each model were carried out ranging the peak period $3 < T_p[s] < 60$ and significant wave height $0.7 < H_s[m] < 1.0$, both at prototype scale. Local Approximation by Simulated Annealing (LASA) method (see Figueres and Medina, 2004) was used to separate incident and reflected waves measured by a group of five capacitance wave gauges. The first LASA method proposed by Medina (2001) is applicable not only to stationary and linear irregular waves, but also to non-stationary and nonlinear wave trains measurements at any number of wave probes. Additionally, wave pressures were measured to estimate wave forces reduction caused by anti-reflective design. Figure 12 shows a scheme of the pressure sensors located in the models.

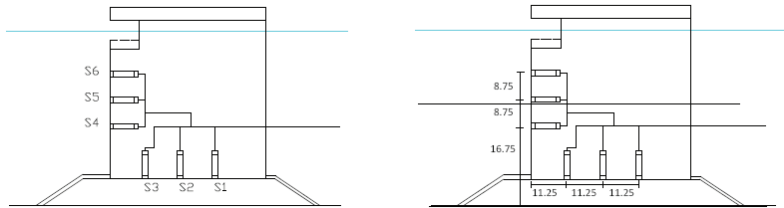


Figure 12: Pressure sensors location (dimensions in cm).

6. Analysis of experimental results

As expected, anti-reflected caisson models (M1, M2 and M3) reflected less energy and experienced less horizontal forces than conventional caisson model (M0). For instance, figure 13 shows typical graph results where dimensionless maximum horizontal forces corresponding to irregular wave tests are plotted.

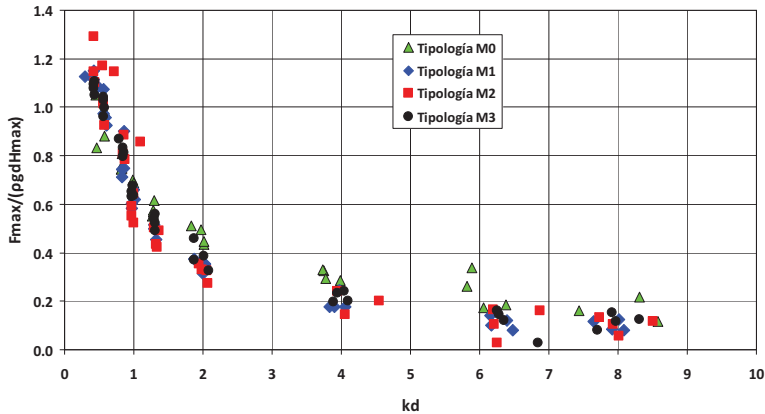


Figure 13: Maximum dimensionless horizontal force (irregular waves)

Instead of the mean reflection coefficient, reflected energy percentage (%ER) (proportional to C_R^2) is used to compare reflection performance from models M1, M2 and M3. The experimental data range were: $0.06 < d_c/d < 0.15$, $0.13 < kd < 8.85$ y $0.03 < B/L_{01c} < 0.71$, in which d and d_c are the water depths at wave basin and chamber respectively, $k=2\pi/L_{01}$ is the wave number corresponding to wave length at wave basin, $B[m]=7.0$ is the width of the anti-reflective zone and L_{01c} is the mean wave period corresponding to d_c .

A Neural Network (NN) methodology similar to that proposed by Garrido and Medina (2006) has been utilized to select variables and analyse and compare results. NN models pruned by Genetic Algorithms have been used to select the significant dimensionless variables and parameters. 80% of data were randomly selected for training and 20% for testing; and the NN model validation criterion depends on the approximation between the mean squared error (MSE) for training and testing data. It has been found that both B/L_{01} and B/L_{01c} described satisfactorily the observed results. Figure 14 compared the reflected energy percentage (%ER) measured and estimated by the NN models. Figure 15 shows reflected energy percentage as function of B/L , for M1, M2 and M3 low-reflectivity caissons. Low-reflected caissons with deeper cells (M2) are more effective than caissons with shallow cells (M1)

for high frequency waves, but they are less effective for very high frequency waves; multi-cell circuits are more effective also for low frequency waves.

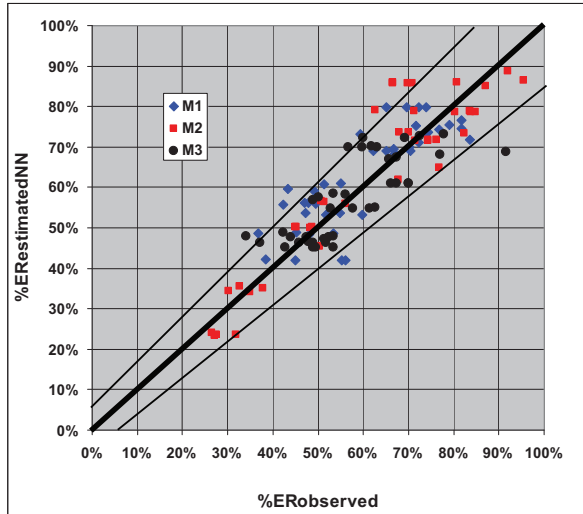


Figure 14: Reflected wave energy (%ER): comparison of NN estimations and measurements

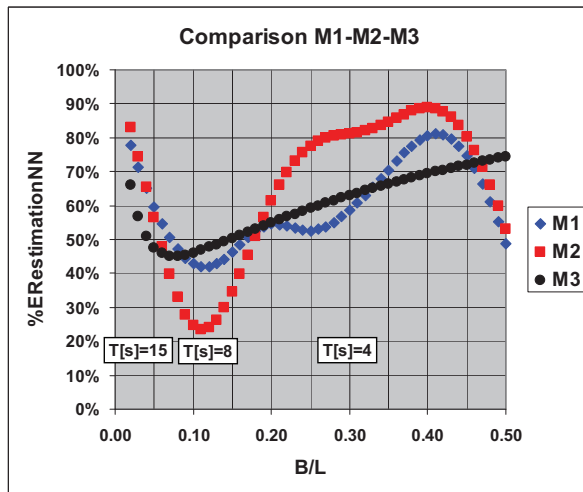


Figure 15: Reflected energy, %ER(B/L), corresponding to caissons M1, M2 and M3

7. Construction test at prototype scale and detailed design

The constructive feasibility of window-type openings in caisson cells has been tested at prototype scale with satisfactory results using the CYES caisson production facility. Caissons has been manufactured, floated-out, towed, sunk and placed in the Valencia Port Northern Extension. Figure 16 shows the prototype scale “stadium caisson” photographs where outer windows are pointed out. In addition to the constructive effectiveness, the methodology used provides a robust structural performance and durability with minor increase of execution periods and costs.



Figure 16: MUCAR experience in CYES floating dock

All the constructive solutions have been tested successfully in the prototype, such as special inner formwork and outer windows, towing, sinking and placement. The sealed pieces used on windows creation to avoid concrete leakage during pouring procedure are shown in figure 17a, while cover protection for towing the caisson to construction site is shown in figure 17b. Figure 18 shows previous tasks to anchor the “stadium caisson” and the cap used for closing external windows. Figure 19 shows caisson cells sand filling execution in Valencia Port: outer windows on caisson beam side are utilized to connect every caisson to adjoining one whereas lateral windows on length caisson side allow to control water excess flow.

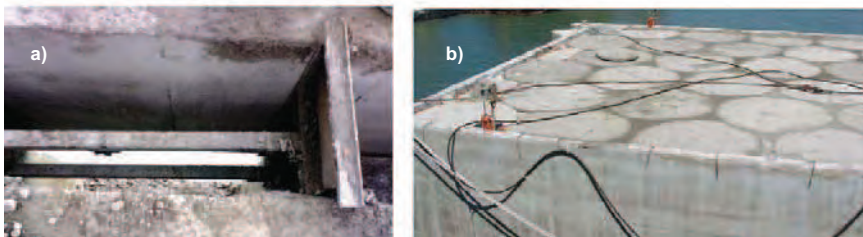


Figure 17: Sealed pieces and cover protection for towing in manufacture caisson process



Figure 18: Caisson details



Figure 19: Caisson cells sand filling in Valencia Port.

Once sand filling is over, part of cover protection pieces fixed in towing process can be used as a support surface to slide metallic formwork for executing superstructure (see Figure 20). Rest of tasks on the crest is similar to those of conventional caissons.



Figure 20: Superstructure execution over quay wall caisson

Since windows opened in a conventional caisson may reduce significantly structural resistance, it is necessary to provide the proper steel reinforcement that assures caisson resistance during construction and service (typically more than 50 years). A numerical 3D FEM caisson's model has been developed to estimate stresses and the optimum reinforcement has been determined. Figure 21 shows the reinforcement graph corresponding to the multi-cell circuit caisson (M3 model), concluding that increase in steel consumption is not relevant compared to a conventional fully reflective caisson.

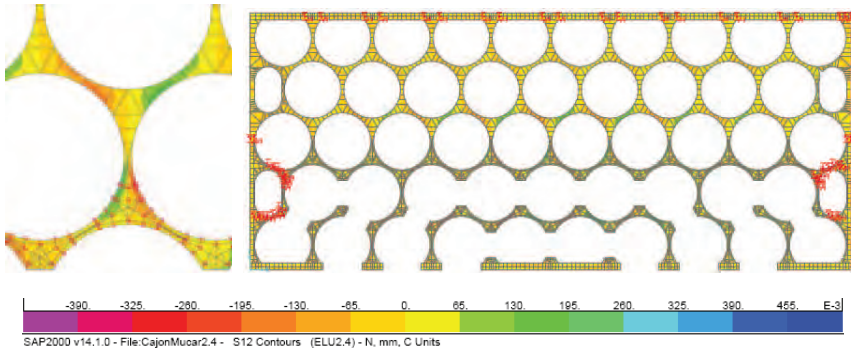


Figure 21: Steel reinforcement and stress map of a multi-cell circuit caisson

8. Summary and conclusions

A new concept for low-reflective caissons based on the multi-cell circuit's concept has been presented: this concept enlarges the run of the wave into the hollow chambers of the low reflective caissons by means of the proper connectivity between adjacent cells. This hollow connected cells-space is named cell-circuit and can be adapted to reduce the disturbance produced by the reflection of a specific wave conditions at caisson. As a result, it could be possible to design a low-reflective caisson with cell-circuits applied to the particular wave conditions on site, and even more, different cell-circuits length combination in one or in a set of adjacent caissons placed in a quay could reduce the reflection in a variety of wave conditions which lead to a better performance and higher functional standards.

A 1/35 physical scale model has been carried out in the wind and wave tunnel of the Universidad Politécnica de Valencia (Spain) and the comparison results between the conventional Jarlan type and multi-cell circuit caissons tests are presented. Experimental conclusions confirm better performance in general and particular effectiveness for reducing the wave reflection in low frequency waves.

In addition to the physical model tests, constructive feasibility has been studied through a variety of new construction procedures and tested at full scale by the "stadium caisson" execution that has been successfully manufactured, floated out, towed, sunk and placed in the Valencia Port.

Reduction in caisson's strength caused by low-reflective multi-cell circuit has been calculated by a numerical 3-D FEM model, and numerical simulations have provided the stress conditions to design steel reinforcement and reinforced concrete geometry to withstand during its functional lifetime.

Finally, cost and time consumption in the "stadium caissons" full scale prototype has been found to be fairly similar to the conventional fully reflective caissons. Also total execution costs as well as fabrication, towing and anchoring time have been found not much different from conventional caissons. As a result, the low-reflective caisson with multi-cell circuits has been proved as a functional, feasible and competitive solution.

9. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors acknowledge the financial support of IMPIVA (*Conselleria de Industria, Comercio e Innovación de la Generalitat Valenciana*) for his partial funding to this I+D+i Project inside the Research Program and Technological Development 2007-201, and also the FEDER and the Spanish Ministry of Science and Innovation (grant TRA2006-11114/TMAR). The authors thank Valencia Port Authority for the constructability tests at the new breakwater.

10. REFERENCES

- Bergmann, H. et al. (2000). "Wave loads on perforated caisson breakwaters" Proc. Coastal Engineering, 2, pp. 1622-1635
- Dhinakaran, G. et al. (2002). "Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves" Ocean Engineering, 29, pp.1981-2004.
- Figueres, M. and Medina, J.R. (2004). "Estimation of Incident and Reflected Waves using a Fully Non-Linear Wave Model." Proc. ICCE 2004, pp. 594-603
- Franco, L., 1994. Vertical breakwaters: the Italian experience. Coastal Engineering, 22, 31-55.
- Fugazza M. , Natale L. (1992), "Hydraulic performance of perforated breakwater", Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE 118, pp. 1-14
- Garrido, J.M. and Medina, J.R. 2006. "Study of Reflection of Perforated Vertical Breakwaters". Proc. ICCE'06, ASCE, 2165-2177.

- Garrido, J.M. y Medina, J.R. (2007). "Modelo Neuronal para Estimar la Reflexión del Oleaje en Diques Verticales Antirreflejantes". Libro de resúmenes de ponencias de las IX Jornadas Españolas de Costas y Puertos p.486-495.
- González-Escrivá, J.A., Zarranz, G., Ripoll, E., Moreno, C. y Medina, J.R.(2009). Elemento Modular "GMAR" y Bloque "ARPA" para Muelles Antirreflejantes. *Libro de ponencias de las X Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos* (in press).
- Hagiwara K. (1984). "Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation", Proc.19th Coastal Engineering Conference, ASCE, pp. 2810–2826.
- Jarlan G.E.(1961) , "A perforated vertical breakwater" , The Dock and Harbour Authority, Vol.41 n°486, pp. 394-398.
- Jarlan G.E. (1965), "The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures" Quart. Bulletin, National Research Council Canada, pp. 23-64
- Jianyi, W. (1992) "Experimental study of perforated caisson breakwater", China Ocean Engineering, 6, pp. 65-78
- Kakuno S. , Tsujimoto G. , Shiozaki Y. (2003). "A design method for double slit-wall breakwaters", Coastal structures 2003, pp. 295-304
- Kondo H. (1979), "Analysis of breakwaters having two porous walls", Int. Proc. Coastal Structures 1979, Vol. 2, pp.962-977
- Marks, W and Jarlan G.E. (1968). "Experimental studies on a fixed perforated breakwaters" Coastal Engineering, 68, pp. 1121-1140.
- Martínez, S., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M., Ponce de León, D., and Berruguete, A., González-Escrivá, J. A. y Medina, J.R. (2009). Proyecto MUCAR: Nuevo diseño de Cajones antirreflejantes (in Spanish). Libro de ponencias de las X Jornadas Españolas de Costas y Puertos (in press).
- Medina, J.R., (2001). "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 127, pp. 213-221.
- Medina, J.R, González-Escrivá, J. A., Fort, L., Martínez, S., Dolores, C., Ponce de León, D., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M. and Berruguete, A. (2009). Estructura Marítima Vertical con Cámaras de Unidades Múltiples para la Atenuación de la Reflexión de Oleaje (in Spanish). Patent ES200931049 presented at Spanish Patent Office.
- Suh K.D., Park W.S. (1995). "Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters" , Coastal Engineering 26, pp. 177–193
- Suh, K.D. et al. (2006). "Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater" Ocean Engineering, Volume 33, Issue 2, pp. 264-280
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003). "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson" J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., Volume 129, Issue 1, pp. 34-40.
- Takahashi S. and Hosoyamada S. (1994). "Hydrodynamic characteristics of sloping-top caissons" Proc. of Int. Conf. on Hydro-technical Eng. for Port and Harbour Construction, PHRI, 1994
- Takahashi, S., (1996). Design of vertical breakwater, Reference Document, No. 34, Port and Harbour Research Institute, 85 p.
- Takahashi, S. et al. (2002) "Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations" Proc. ICCE 2002, ASCE, pp. 1365-1376.

CRISTALIZACIÓN SIMULADA PARA EL ANÁLISIS DE OLEAJE INCIDENTE Y REFLEJADO CON UN MODELO DE ONDA STOKES-V

Miguel Figueres, Joaquín M. Garrido y Josep R. Medina
Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia,
Camino de Vera 14, 46071 Valencia, Telf: 963877375, Fax: 963877379
e-mail: mifimo@cam.upv.es, jgarrido@tra.upv.es, jrmedina@tra.upv.es

INTRODUCCIÓN

El presente artículo describe una extensión del método LASA de Medina(2001) para la separación de oleaje incidente y reflejado (en lo sucesivo I+R) que permite su aplicación a oleaje no estacionario y no lineal. La mejora presentada utiliza un modelo de onda empírico tipo Stokes-V, que permite analizar oleaje no lineal muy peraltado. Este método de separación de oleaje I+R se denominará en lo sucesivo LASA-V.

SEPARACIÓN DE OLEAJE INCIDENTE Y REFLEJADO

La estimación de oleaje incidente y reflejado es un problema de difícil resolución que se presenta en los experimentos de laboratorio y de campo, ya que las mediciones que se realizan incluyen oleaje I+R. El oleaje reflejado es parte de la respuesta de la estructura a estudiar y esa respuesta que desconocemos tiene que determinarse a partir de los valores de oleaje total medidos en los experimentos. Este oleaje total es la suma del oleaje incidente y reflejado. Por consiguiente, es importante la descomposición correcta de la señal total en sus componentes incidente y reflejada, para poder modelizar y diseñar correctamente las estructuras marítimas. La mayor parte de las formulaciones existentes se refieren a las características del oleaje incidente, que suele considerarse la acción principal sobre las estructuras marítimas. La separación de los campos de oleaje incidente y reflejado también es necesaria para comprobar la precisión de los sistemas generadores de oleaje en laboratorio, así como para la verificación y creación de generadores de oleaje con absorción activa de reflexiones.

Métodos de análisis de oleaje incidente y reflejado

El primer método propuesto para separar oleaje I+R y fundamento de la familia de métodos de separación más numerosa es el “2-point”, popularizado por Goda y Suzuki (1976). Este método supone unas hipótesis que solo se cumplen en simulaciones numéricas de oleaje (ver Medina 2001): (1) relación de dispersión lineal, (2) oleaje estacionario y lineal, (3) superposición de ondas, (4) ondas periódicas y (5) señal sin ruido. El “2-point” es un método definido para oleaje regular monocromático que se aplica al oleaje irregular trabajando en el dominio de la frecuencia; se calcula el espectro de frecuencias del registro original, obtenido a partir de la transformada discreta

de Fourier y se opera con las componentes como si fueran independientes. Otra característica de este método es que la estimación global de oleaje I+R viola el principio de causalidad, ya que valores pasados del análisis dependen de valores futuros.

A partir del método 2-point se han desarrollado otros métodos con más sensores como son el “3-point” de Mansard y Funke (1980) y el método para n-puntos de Zelt y Skjelbreia (1993) o el Baquerizo (1997). Otro método basado en el 2-point es el método de Kimura (1985), que emplea la aproximación local por ventanas temporales gaussianas, permitiendo el análisis de oleaje no estacionario. La optimización local en cada ventana se realiza mediante el método “2-point” suponiendo que el oleaje es lineal.

A continuación se revisa la estimación de oleaje I+R mediante el método LASA, desarrollado por Medina (2001) y que se denominará LASA-II. Las siglas LASA significan *Local Analysis using Simulated Annealing*, (Análisis Local usando Cristalización Simulada). Se trata por tanto de un método de separación de oleaje I+R por aproximación local a un modelo de onda. En este método, el registro se discretiza en ventanas temporales cuyas soluciones finalmente se superponen mediante una ley triangular. Se permite así analizar oleaje no estacionario y no lineal, ya que el modelo de onda local es de tipo Stokes-II. La optimización local en cada ventana temporal se realiza mediante cristalización simulada. El LASA-II es un método de análisis en el dominio del tiempo, evitando los inconvenientes del análisis espectral, del análisis global y de la suposición de linealidad del oleaje. El modelo de onda local empleado en el LASA-II es un modelo de 2 componentes incidentes y 2 reflejadas. Estas componentes son ondas no lineales del tipo Stokes-II, como se puede ver en las ecuaciones 1 y 2 (ver Medina, 2001), este modelo de onda tiene un total de 17 parámetros que deben ser ajustados a las observaciones; este ajuste se realiza mediante la técnica de cristalización simulada o recocido simulado (*Simulated Annealing*).

$$Z_{ic}(x, t, m \cdot \Delta t) = A_0 + A_{1m} \cdot \cos(k_{1m} \cdot x - \omega_{1m} \cdot t + \epsilon_{1m}) + A_{12m} \cdot \cos(k_{2m} \cdot x - \omega_{2m} \cdot t + \epsilon_{2m}) + CNI \quad (1a)$$

$$CNI = A_{21m} \cdot \cos(2 \cdot (k_{1m} \cdot x - \omega_{1m} \cdot t) + \epsilon_{1m}) + A_{22m} \cdot \cos(2 \cdot (k_{2m} \cdot x - \omega_{2m} \cdot t) + \epsilon_{2m}) \quad (1b)$$

$$Z_{re}(x, t, m \cdot \Delta t) = A_{13m} \cdot \cos(k_{3m} \cdot x + \omega_{3m} \cdot t + \epsilon_{3m}) + A_{14m} \cdot \cos(k_{4m} \cdot x + \omega_{4m} \cdot t + \epsilon_{4m}) + CNR \quad (2a)$$

$$CNR = A_{23m} \cdot \cos(2 \cdot (k_{3m} \cdot x + \omega_{3m} \cdot t) + \epsilon_{3m}) + A_{24m} \cdot \cos(2 \cdot (k_{4m} \cdot x + \omega_{4m} \cdot t) + \epsilon_{4m}) \quad (2b)$$

donde Z_{ic} y Z_{re} son los niveles correspondientes a la onda incidente y reflejada respectivamente, ω_m es la frecuencia angular y k_m es la longitud de onda relacionadas mediante la relación de dispersión

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot h) \quad (3)$$

La cristalización simulada, al igual que los algoritmos genéticos, las redes neuronales o los sistemas borrosos, son métodos numéricos desarrollados en el campo de la inteligencia artificial que están resultando muy útiles en la solución de problemas de optimización. La cristalización simulada (recocido simulado) está inspirada en la mecánica estadística que rige la cristalización de los

metales (templado del acero). Es una técnica de búsqueda en serie de soluciones, muy adecuada para resolver problemas optimización combinatoria. Consiste básicamente en crear un motor de soluciones nuevas (B) a partir de soluciones antiguas (A) y definir una función de coste para cada posible solución. Se crean las dos primeras soluciones A y B y se cambia de la solución A a la solución B con el siguiente criterio:

- Si la solución B es mejor (menor coste) que A, se cambia directamente B por A.
- Si la solución B es peor que A (mayor coste), hay una probabilidad de cambiar a B por A en función de los costes de las soluciones y de un parámetro de control c_k , asimilable a la temperatura del sistema. La expresión que define la probabilidad de este cambio de solución es la siguiente:

$$P(\text{cambio}) = \exp\left(-\frac{C_B - C_A}{c_k}\right) \quad (4)$$

Éste método permite evitar los mínimos locales de la función objetivo (función de coste) en el hiperespacio de soluciones. El algoritmo del LASA consta de los siguientes pasos:

1. Definición de una función de coste. LASA toma el error medio cuadrático relativo entre niveles observados y estimados.
2. Determinación de un sistema generador de soluciones en serie, mediante unas determinadas probabilidades de cambio de los parámetros
3. Para que la cristalización simulada sea más eficiente, se ha de tomar una buena solución inicial. LASA utiliza la solución de la ventana anterior y una aproximación monocromática “todo-incidente” en la primera ventana.
4. Se elige un valor inicial de la temperatura
5. Se fija la regla de reducción de dicha temperatura
6. La longitud de las Cadenas de Markov es el número de iteraciones que se realizan con cada valor de C_k
7. Se define un criterio de parada como un número máximo de Cadenas de Markov o un error mínimo

Un esquema del algoritmo empleado en el LASA sería:

- 1º. Para cada ventana: Se elige una solución inicial y un parámetro de control
- 2º. Para cada cadena de Markov: Se reduce el valor del parámetro de control
- 3º. Para cada iteración dentro de las cadenas de Markov: Se halla una nueva solución y se compara con la anterior mediante la cristalización simulada, finalmente se comprueba si se cumple alguno de los criterios de salida del bucle.

Una vez halladas las soluciones en todas las ventanas, se realiza la reconstrucción del registro mediante la superposición con la ley triangular anteriormente descrita.

Las principales ventajas del LASA frente a los métodos tradicionales de estimación de oleaje incidente y reflejado son: (1) la poca sensibilidad al ruido de la señal medida, tanto en frecuencias altas como bajas, (2) el trabajo en el dominio del tiempo permitiendo el análisis de oleaje no lineal y no estacionario; todo ello evita muchos de los inconvenientes de los métodos globales derivados del “2-point”.

MODELO LASA-V: OLEAJES NO LINEALES MUY PERALTADOS

El oleaje muy peraltado (cociente H/L alto) y asimétrico, con crestas apuntadas y senos más anchos, se da tanto en experimentos de laboratorio como en la realidad, limitando la eficacia de muchos métodos de separación de oleaje. Este tipo de oleaje no lineal se da sobretodo con alturas de ola grandes en relación a la longitud de la onda (ondas muy peraltadas) o en relación a la profundidad (condiciones de profundidad intermedia o reducida) tanto en oleajes regulares, como irregulares.

Para el análisis de registros de oleajes no lineales muy peraltados, es necesario entonces un modelo de onda de orden superior al Stokes-II utilizado por el LASA-II. En este caso, se presenta un modelo de onda empírico de tipo Stokes-V, que permite el ajuste a oleajes de mayor asimetría. El parámetro de asimetría que se utiliza en este artículo es el apuntamiento A_p , definido como el cociente entre la amplitud de la cresta de la onda A_c y la amplitud del seno:

$$A_p = \frac{A_c}{|A_s|} \quad (5)$$

El modelo local de onda Stokes-II usado en el LASA-II propuesto por Medina(2001), alcanza un valor máximo de apuntamiento $A_p=1.66$, correspondiente a un valor de la amplitud de la componente no lineal de un 25% de la amplitud de la componente principal de la onda. El modelo de onda Stokes-V empírico alcanza fácilmente valores de apuntamiento $A_p > 3$ observados en el laboratorio. Un ejemplo de oleaje muy apuntado, con valores de $A_p = 10.2 / |-3.05| > 3$ es el correspondiente a una ensayos del nuevo dique en talud para el Puerto de Gijón, representado en la Figura 1.



Figura 1.- Ejemplo de oleaje muy apuntado

Definición del modelo de onda empírico Stokes-V

El nuevo modelo de onda desarrollado tiene la siguiente forma:

$$\eta(x, t) = \sum_{i=1}^5 A_i \cdot \cos(i \cdot (k \cdot x - \omega \cdot t) + \varepsilon) \quad (6)$$

donde los parámetros A_i se definen como aquellos que minimizan la varianza de la segunda derivada de la función $\eta(x, t)$ para un apuntamiento dado, y que cumplen con la condición de que en $x \in [0, L/2]$ la función es monótona decreciente. La obtención de dichos valores se realizó mediante la combinación de métodos Montecarlo y un barrido inicial de valores (A_i, A_p).

De este modo, se obtienen los parámetros A_i en función del apuntamiento A_p . Por sencillez, se expresa cada parámetro $A_i, i = 2, \dots, 5$ como un porcentaje unitario de la amplitud A_1 de la componente principal:

$$A_i = f(A_p) \cdot A_1; f(A_p) \in [0, 1] \quad (7)$$

Las funciones $f_i(A_p)$ son las que se muestran en la Figura 2.

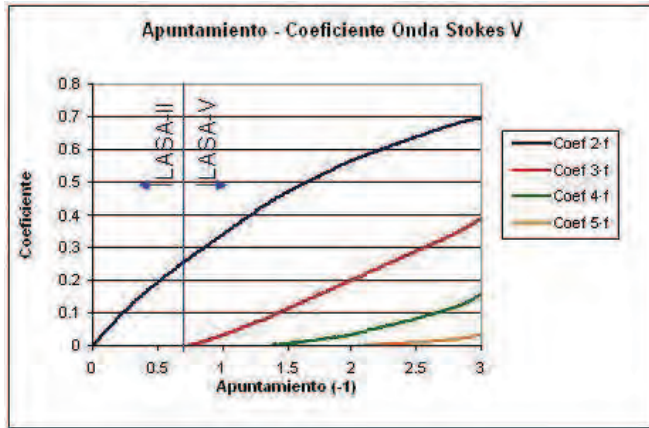


Figura 2.- Parámetros $f_i(A_p) = A_i / A_1$ función del apuntamiento A_p

A partir de los valores discretos obtenidos mediante la búsqueda Montecarlo, se interpolan las funciones $f_i(A_p)$ mediante el ajuste por mínimos cuadrados de polinomios de hasta orden 5. Los coeficientes c_{ij} de dichos polinomios son los que se muestran en la tabla de la Figura 3.

i\j	6	5	4	3	2	1	0	LimA _i
1	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0.00661215	-0.08205434	0.41932834	0	1
3	0	0	0	-0.0058388	0.0302053	0.13176353	0	1.75
4	0	0.11782327	-0.44384254	0.59325094	-0.29923493	0.10775683	0	2.4
5	0	0.10172429	-0.21408715	0.18779623	-0.07645279	0.03661205	0	3

Figura 3.- Valores de los coeficientes c_{ij} de los parámetros A_i

Si se llama c_{ij} a los coeficientes de la tabla, se puede reescribir el valor de los parámetros A_i como:

$$A_i = f_i(A_p) \cdot A_1$$

$$f_i(A_p) = \begin{cases} 0 & \text{si } A_p < \text{Lim}A_i \\ \sum_{j=0}^5 c_{ij} \cdot (A_p - \text{Lim}A_i)^j & \text{si } A_p \geq \text{Lim}A_i \end{cases} \quad (8)$$

Una vez obtenidos los valores de A_i en función de A_p , se puede obtener la onda para cualquier apuntamiento. Las formas a las que da lugar el modelo de onda descrito, son las que se muestran en la Figura 4.

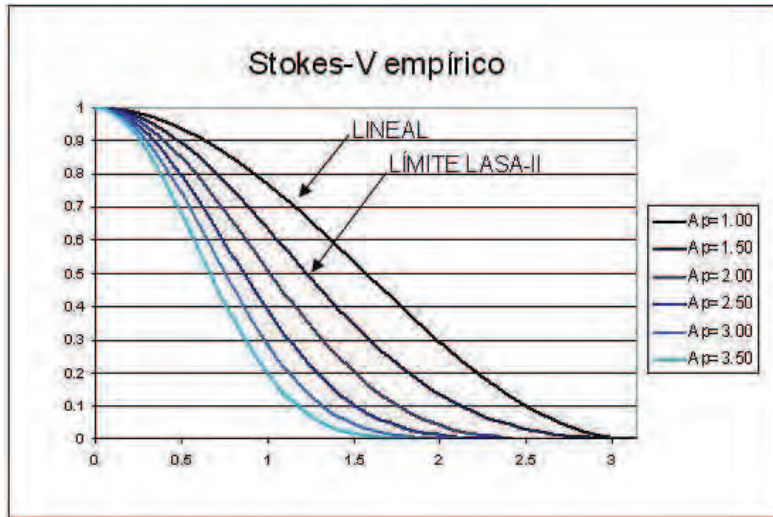


Figura 4.- Stokes-V para diferentes valores de apuntamiento

Ejemplos de aplicación del LASA-V

El LASA-V se ha implementado en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV), dando buenos resultados en el análisis de oleaje incidente y reflejado (Garrido et al., 2002). En la Figura 5 podemos ver un ejemplo de análisis de oleaje regular ligeramente apuntado. La comparación del LASA-V con el método de análisis de oleaje incidente y reflejado mediante filtros digitales de Frigaard y Brorsen (1995), y con el método de Baquerizo (1997), basado en el “three-point least squares” de Mansard y Funke (1981), ha demostrado la superioridad del LASA-V en el análisis de oleajes con apuntamientos importantes. La comparación se realiza estudiando la correlación entre oleaje incidente y presiones en el espaldón de un dique en talud (Garrido et al., 2003). También se ha aplicado el LASA-V a los ensayos a escala 1:50 del dique de la ampliación del Puerto de Gijón, cuyas condiciones de oleaje en el punto de diseño dan

lugar a oleajes muy apuntados. El LASA-V consigue ajustar el modelo de onda con un error medio relativo muy bajo, inferior en algunos casos al 8%. En la Figura 6, se puede observar un ejemplo de registro analizado mediante el LASA-V. En ella se puede observar que las condiciones de oleaje y profundidad (Espectro tipo JONSWAP $\gamma = 4$; $H = 11\text{m.}$; $T_p = 15.8\text{s.}$; $h = 29.6\text{m.}$) dan lugar a oleajes sensiblemente no lineales con apuntamientos A_p superiores a 3.

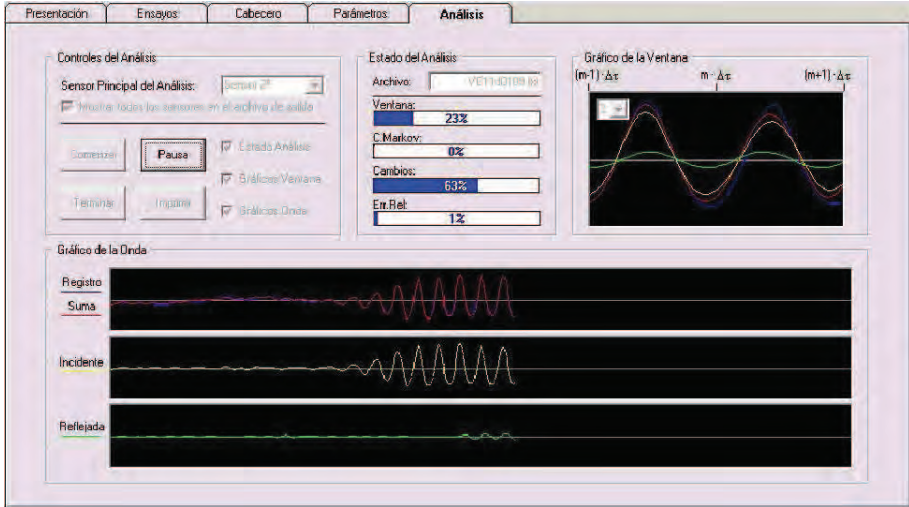


Figura 5.- Ejemplo de ejecución del LASA-V

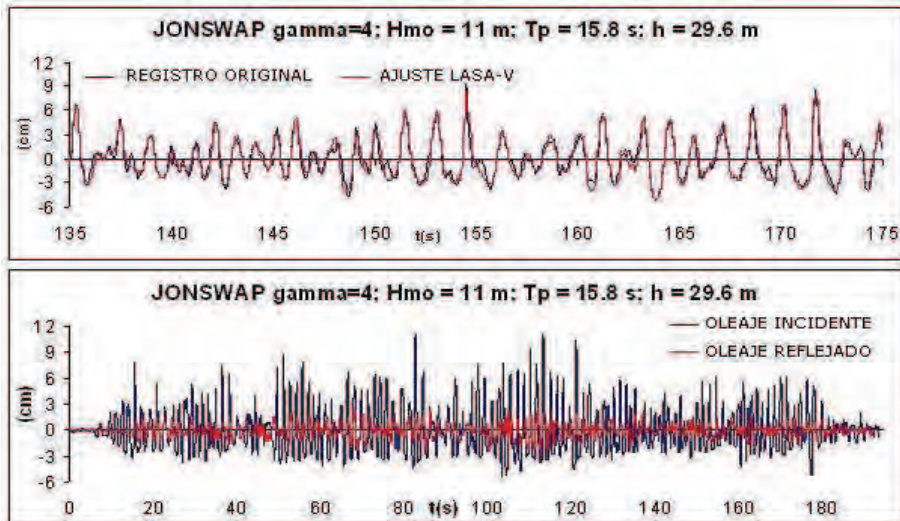


Figura 6.- Análisis de oleaje sensiblemente apuntado

CONCLUSIONES

El LASA-V conserva las ventajas del LASA-II original, en cuanto a que es poco sensible al ruido, permite el análisis de oleaje no estacionario, no lineal y es un modelo de onda en el dominio del tiempo, pero presenta una mejora sustancial que consiste en la posibilidad de analizar oleajes muy peraltados con los apuntamientos A_p superiores a 3 que se observan en algunos ensayos. Además, se ha demostrado la posibilidad de aplicar el concepto LASA de Medina (2001) con diferentes modelos de onda. En esta línea, el desarrollo de modelos de onda que relacionen el oleaje medido en superficie con el campo de velocidades y presiones del fluido (Fenton, 1999) permitirán nuevos métodos de análisis de oleaje I+R y el diseño de métodos de absorción de la reflexión, empleando sensores de presión y de velocidad, además de los sensores de nivel. Del mismo modo, el empleo de modelos de onda para campos de oleaje en 3D, permitirá la aplicación del método a ensayos de oleaje direccional.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico proporcionado por Puertos del Estado, la Autoridad Portuaria de Gijón, el Ministerio de Fomento, FEDER y el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto MUDIVAR REN2002-02951).

REFERENCIAS

- Baquerizo, A., Losada, M.A., Smith, J.M., and Kobayashi, N. (1997). "Cross-shore variations of wave reflection from beaches" *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 123(5), 274-279.
- Fenton, J.D. (1999) Numerical Methods for Nonlinear Waves, in *Advances in Coastal and Ocean Engineering*. P.L.-F. Liu (Ed). World Scientific. Pp 241-324.
- Frigaard, P. and Brorsen, M. (1995). "A new time-domain method for separating incident and reflected waves". *Coastal Engineering*, 24, 205-215.
- Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A y Medina, J.R. (2003). "Influencia de los grupos de olas en el rebase y esfuerzos sobre el espaldón de diques en talud". *VII Jornadas de Puertos y Costas*, Almería (in press).
- Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. and Medina, J.R. (2002). "Analysis of wave groups using simulated annealing". Proceedings of the 28th ICCE, ASCE, 2002. Vol. 1, 142-152.
- Goda, Y., and Suzuki, Y. (1976) "Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments" *Proc., 15th ICCE*, ASCE, 828-845.
- Kimura, A. (1985). "The decomposition of incident and reflected random wave envelopes." *Coastal Engineering in Japan*, 28, 59-69.

- Mansard, R.P.D., and Funke, E.R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method." Proc., *17 th ICCE*, ASCE, 154-172.
- Medina, J.R. (2001). "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing". *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE*, 127(4), 213-221.
- Medina, J.R., Joaquín M. Garrido y Jose A. González-Escrivá (2001); "Cristalización simulada para el análisis de oleaje incidente y reflejado"; *VI Jornadas españolas de ingeniería de costas y puertos*.
- Zelt, J.aA., and Skjelbreia, J.E. (1993). "Estimating incident and reflected wave fields using arbitrary number of wave gauges." Proc., *23rd ICCE*, ASCE, 777-789.

ESTUDIO DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN DIQUES VERTICALES ANTIRREFLEJANTES

J. M. Garrido, M. Figueres y J.R. Medina

Laboratorio de Puertos y Costas, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia, Camino. de Vera, 14, 46071 Valencia, e-mails: jgarrido@tra.upv.es, mifimo@doctor.upv.es, jrmedina@tra.upv.es

RESUMEN

Se presentan los resultados experimentales del estudio realizado en el canal de oleaje y viento de la Universidad Politécnica de Valencia sobre diques verticales antirreflejantes tipo Jarlan con una, dos y tres cámaras, tanto para paredes perforadas con ranuras como con orificios. El resultado experimental obtenido para el Coeficiente de Reflexión (CR) estimado con el método de separación de oleaje incidente y reflejado LASA se ajusta razonablemente a la estimación del CR dada por la fórmula de Fugazza y Natale. De los resultados experimentales se concluye que en cajones de una sola cámara se obtienen reducciones del CR menores al 40% para rangos de ancho relativo, B/L, de 0.1 a 0.3, mientras que en cajones de dos o tres cámaras este rango se amplía, siendo menores los valores de CR para cajones compuestos por tres que por dos cámaras. Por otra parte, se observa una mayor efectividad en la reducción de las reflexiones cuando las paredes están perforadas de ranuras que cuando la perforación es de orificios.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha experimentado un importante desarrollo del comercio internacional y del transporte marítimo, lo que se ha visto reflejado en el aumento constante del calado de los buques y la ampliación de los puertos hacia mayores profundidades, con el consiguiente empeoramiento de las condiciones del oleaje. Por otra parte, la ocupación por las ciudades de las dársenas interiores de los puertos, la escasez de materiales de cantera y los problemas ambientales derivados de la explotación de las mismas, así como la ampliación de la flota de cajoneros de las constructoras españolas, han propiciado el auge en el proyecto de diques verticales y de muelles de cajones en detrimento de los diques en talud, tipología que hasta ahora ha sido mayoritaria en la construcción de diques de abrigo en España. Además de estos condicionantes las

estructuras de pared vertical presentan numerosas ventajas como son el mejor aprovechamiento del espacio marino, el ahorro económico en materiales y plazos de ejecución o la facilidad para el amarre de embarcaciones a lo largo del dique. Sin embargo, el dique vertical se caracteriza por la reflexión casi total de la energía del oleaje, hecho que en ocasiones invalida la solución con tipología vertical cuando la reflexión implica un aumento importante de las condiciones de agitación en el canal de entrada, antepuerto y dársenas interiores, así como, el aumento de la altura de ola máxima, con el consiguiente aumento de la erosión local, el rebase, los esfuerzos sobre el dique y el coste de la estructura. Para reducir la reflexión de los diques y muelles verticales se han desarrollado diques verticales y muelles de baja reflectividad, compuestos en su mayoría por cámaras huecas que permiten la entrada de agua en su interior a través de los huecos en las paredes de las mismas. Este tipo de estructuras marítimas están siendo adoptados por su capacidad de absorción de energía, la mayor estabilidad del cajón, la reducción del rebase, reducción de la erosión, reducción de fuerzas sobretodo impulsivas (Takahashi and Hosoyamada, 1994) con el consecuente ahorro económico que ello supone.

Sin embargo, a pesar de lo variado de las tipologías y del uso cada vez más creciente de estas estructuras marítimas, el conocimiento de su complejo comportamiento hidráulico y de las fuerzas hidrodinámicas necesarias para su diseño es limitado. En este artículo se profundiza en el estudio experimental de las estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan en su relación con la reducción del coeficiente de reflexión y se comparan los resultados experimentales de ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV) con los obtenidos aplicando el modelo teórico de Fugazza and Natale (1992).

Disipación de la reflexión en diques verticales antirreflejantes

Las estructuras marítimas antirreflejantes se basan en el principio de las cámaras disipantes de energía mediante paredes perforadas sobre las que incide el oleaje que es parcialmente reflejado en el primer paramento frontal perforado y parcialmente transmitido dentro de la cámara o cámaras del dique para reflejarse posteriormente con un desfase que interfiere la primera reflexión en el paramento frontal. La disipación de energía es debida a la viscosidad del flujo a su paso por las perforaciones de la pared y a la interferencia entre ondas. Con una cámara, estas pérdidas dependen sobretodo del periodo del oleaje y de la distancia (B) entre el paramento frontal perforado y la pared posterior. La máxima pérdida de energía ocurrirá cuando la velocidad inducida por el oleaje sobre la pared sea máxima en la pared perforada: esto ocurrirá cuando la anchura de la cámara es aproximadamente un cuarto de la longitud de onda (L) en la cámara ($B \approx L/4$). Por el contrario, cuando la velocidad es pequeña, la pérdida de energía es baja pared perforada y cámara única es poco eficiente ($B \approx L/2$). Por lo tanto, existe una porosidad y dimensiones óptimas de la pared perforada y cámara para obtener una reflexión mínima. Por otra parte, se produce un efecto de disipación de energía en el interior de la cámara debida a otros factores, tales como la interacción de los chorros de agua procedentes de las aberturas de la pared perforada con el agua almacenada en la cámara y las turbulencias propias de éste. Además, podría considerarse el efecto de la diferencia de profundidades entre el interior y el exterior de la cámara como una causa más de disipación de energía. Todo ello, unido a las numerosas variables que intervienen en el proceso, tanto geométricas como características del oleaje, hace muy complejo el estudio del comportamiento del flujo en esta tipología de estructuras marítimas.

A partir de la idea original propuesta por Jarlan (1961, 1965) y la aplicación en Canadá (Comeau Bay, 1966) y en Japón (Kobe Port, 1969 y Takamatsu Port, 1970), son muchas las variedades que sobre éste se han venido realizando a lo largo de los años, especialmente en Japón (Takahashi, 1996), donde se han construido cajones tipo ranura,

multi-cámara, planos, inclinados y curvados; o en Italia, donde se han instalado diques perforados en Porto Torres, Sardina, Palermo y Sicilia (Franco, 1994). Entre las más usadas destacan los cajones de pared perforada para la construcción de diques verticales, las estructuras formadas por simples o múltiples pantallas con porosidad y espaciado variable y las piezas o bloques prefabricados para muelles. Típicamente, las paredes tienen ranuras verticales y horizontales u orificios circulares o rectangulares. La porosidad de la pared, definida como la relación entre el área perforada y el área total de pared, suele estar comprendida entre 15-40% y el ancho de la cámara, B, entre 1/10 y 1/4 de la longitud de onda local o en las proximidades del dique. A pesar de lo variado de las tipologías y del uso creciente de las estructuras marítimas antirreflejantes, el conocimiento a cerca de su complejo comportamiento hidráulico y de las fuerzas hidrodinámicas necesarias para su diseño es limitado.

El primer estudio experimental importante de diques antirreflejantes puede atribuirse a Jarlan (1961) quien ensayó a escala 1:30 el cajón de una cámara y pared frontal perforada con orificios y porosidad 0.49. Como resultado encontró que la reducción de la reflexión era significativa para determinados valores de longitud de onda. Marks and Jarlan (1968) realizaron ensayos con oleaje irregular y realizaron un análisis espectral para estudiar las características de las fuerzas. También observaron que la erosión producida en la base del cajón apoyado sobre fondo de arena con oleaje regular se reducía con pared perforada. Jianyi (1992) diseñó de un dique vertical tipo cajón perforado y realizó ensayos de modelo con oleaje regular e irregular que demostraron que el dique vertical tipo cajón perforado tiene ventajas de bajo coeficiente de reflexión, absorción del oleaje, disminución de la altura de ola y del rebase. Bergmann et al. (2000) compararon resultados de reflexión con diques de una sola cámara con cajones de varias cámaras y comprobaron la reducción de fuerzas sobre la estructura para un rango mayor de frecuencias que con una sola cámara. Dhinakaran et al. (2002) llevo a cabo ensayos físicos para estudiar el comportamiento hidráulico y las presiones de una tipología de dique semicircular consistente en un dique mixto de cajón semicircular sobre escollera obteniendo que las fuerzas horizontales eran pequeñas comparadas con las verticales y se ven reducidas considerablemente debido a la curvatura de la pared comparadas con las de un dique vertical. Tabet-Aoul and Lambert (2003) realizaron ensayos dentro del proyecto europeo PROVERBS y propusieron un método empírico para el cálculo de máximas fuerzas horizontales desarrollado a partir de los resultados de los ensayos y testado con los datos existentes en prototipo.

En cuanto a modelos teóricos, Jarlan (1965) aplicó la teoría acústica a la reflexión del oleaje en estructuras marítimas. Kondo (1979) presentó una aproximación analítica para estimar el coeficiente de reflexión y transmisión para diques permeables e impermeables con 2 paredes perforadas de orificios. Hagiwara (1984) propuso un análisis teórico usando la ecuación integral derivada para las componentes desconocidas de la velocidad horizontal en la pared permeable para estimar el coeficiente de reflexión y de transmisión de estructuras verticales disipadoras del oleaje. También estudió la influencia de las características estructurales y del oleaje sobre la capacidad de disipación de un dique con pared permeable a ambos lados, mar y tierra. Fugazza and Natale (1992) analizaron la atenuación del oleaje producida por una estructura permeable y propusieron una fórmula para optimizar el diseño hidráulico de los diques tipo Jarlan. Suh and Park (1995) desarrollaron un modelo para predecir el coeficiente de reflexión de un dique vertical perforado que es cimentado sobre escollera con oleaje direccional. Takahashi et al. (2002) aplican el método numérico VOF para el estudio de la reflexión en un cajón perforado. Kakuno et al. (2003) aplicó un procedimiento de diseño basado en el método numérico BIM (Boundary Integral Method) cuyo objetivo fue alcanzar un coeficiente de reflexión máximo del 40% en un amplio rango de frecuencias mediante diseño de doble pantalla ranurada. Suh et al. (2006) describen como aplicar el modelo analítico desarrollado por Suh and Park (1995) a un dique vertical parcialmente perforado y con oleaje irregular.

MODELO EXPERIMENTAL

Diseño experimental

El objetivo buscado con el ensayo 2D a escala reducida es principalmente el estudio de la reflexión del oleaje en el dique vertical con el que se pretende conocer los coeficientes de reflexión (CR) de la estructura variando diferentes parámetros estructurales: ancho de cámaras, B, porosidad de las paredes y número de cámaras.

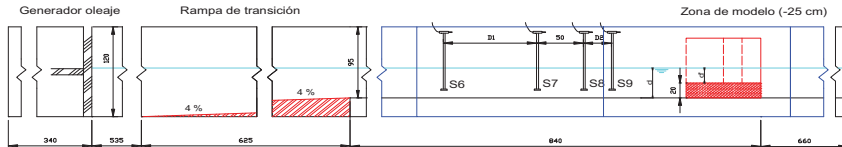


Figura 1. Posicionamiento de sensores y modelo físico en el canal de ensayos del LPC-UPV

Para ello, se realizarán ensayos regulares e irregulares en el canal de oleaje y viento del LPC-UPV que tiene 30 m de largo y una sección de 1.2 m x 1.2 m, con un falso fondo en la zona de modelo que se eleva hasta 0.25 metros mediante la transición de una rampa de pendiente del 4% desde la zona de pala a la zona de modelo. Con esta elevación se favorece evitar sobre-elevaciones de la lámina de agua y permite la generación de oleaje a una profundidad mayor en la zona de pala con la posibilidad de atacar el modelo con oleajes de mayor intensidad no condicionados por la “rotura en pala” de los canales de fondo uniforme. (Fig. 1) El sistema de generación de oleaje consta de un compresor oleoneumático que suministra aceite a presión a un pistón de doble efecto, con un recorrido máximo de la pala de 80 cm.

La instrumentación utilizada en los ensayos es la que garantiza una correcta medición del oleaje incidente y reflejado mediante métodos de separación del oleaje tales como el LASA (Medina, 2001) o el de Baquerizo (1997) que aconsejan establecer las distancias entre sensores relativas a las longitudes de onda del oleaje.

Las tipologías de dique ensayadas son secciones de dique vertical antirreflejante tipo JARLAN (Fig. 2), resultantes de combinar diferentes variables estructurales, como son: el número de cámaras (C1, C2 y C3), el ancho de cámara (B1= 60 cm, B2= 40 cm, B3= 20 cm), geometría de perforación de paneles (orificios y ranuras) y la porosidad, medida como superficie perforada respecto de la superficie total (Orificios: $p_1=0.35$, $p_4=0.26$, $p_5=0.13$; Ranuras: $r_1=0.4$, $r_2=0.3$, $r_3=0.2$).

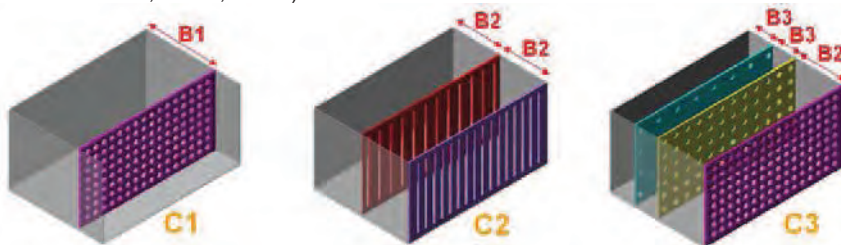


Figura 2. Ejemplos de tipologías de dique vertical antirreflejante tipo Jarlan ensayados.

Los trenes de oleaje regular tienen una duración suficiente para llegar a la estabilización de las reflexiones en el canal con $h(\text{cm})=32, 40, 36$, periodos $0.6 < T(\text{s}) < 3.45$ y altura de ola $4 < H(\text{cm}) < 16$.

Los trenes de oleaje irregular constan de unas 1000 olas, representativas de los diferentes parámetros estadísticos que caracterizan el oleaje irregular, con espectro JONSWAP ($\gamma=3.3$), profundidad en la zona de modelo $h(\text{cm})=32$ y 40 , períodos de pico $1.0 < T_p(\text{s}) < 2.5$ y altura de ola significativa $H_s(\text{cm})=4$ y 8 .

ANÁLISIS Y RESULTADOS

Se han analizado y obtenido los resultados de todos los parámetros característicos del oleaje mediante el software LPCLab, desarrollado por el LPC-UPV, tanto en el dominio espectral como temporal de los registros de oleaje total medido en cada sensor y de las series de oleaje incidente y reflejado estimadas por el método de separación de oleaje LASA de Medina (2001) y Figueres y Medina (2004) aplicables a oleajes no lineales no estacionarios. Se ha calculado el coeficiente de reflexión (CR) en ambos casos y se ha generado un informe de resultados conjunto para cada uno de los ensayos.

Método LASA-V para la separación de oleaje Incidente y Reflejado

El LASA-V (Figueres et al., 2003) conserva las ventajas del LASA original (Medina, 2001), en cuanto a que es poco sensible al ruido, permite el análisis de oleaje no estacionario, no lineal y es un modelo de onda en el dominio del tiempo, pero presenta una mejora sustancial que consiste en la posibilidad de analizar oleajes muy peraltados con los apuntamientos, A_p , superiores a 3 que se observan en algunos ensayos.

Este método de separación de oleaje incidente y reflejado se caracteriza por: (1) la posibilidad de realizar una aproximación local de la estimación mediante ventanas temporales triangulares, (2) el ajuste en cada ventana de un modelo de onda de 2+2 componentes de tipo Stokes-V aproximado mediante cristalización simulada, (3) permite analizar oleaje No-Lineal y No-Estacionario y (4) es poco sensible al ruido. En la Fig. 3 se puede ver un ejemplo gráfico en el que se compara, por un lado, la onda original con la estimada y, por otro la onda incidente y su reflejada en un caso de oleaje regular.

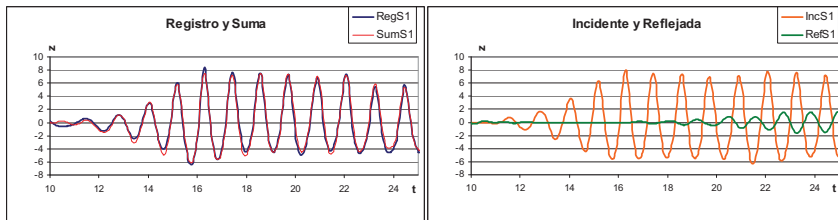


Figura 3. Ejemplos de estimación oleaje incidente y reflejado con método LASA (Medina, 2001)

Modelo analítico de Fugazza and Natale (1992)

Fugazza y Natale (1992), en lo sucesivo F&N, proponen un método analítico empleando la teoría lineal de ondas para determinar el coeficiente de reflexión con oleaje regular e irregular en un dique perforado de "N" cámaras, que permite realizar un primer diseño de esta tipología de diques. El método tiene en cuenta la pérdida de carga que se produce al atravesar las paredes perforadas mediante la expresión

$$\alpha = \left(\frac{1}{r \cdot C_c} \right)^2 - 1 \quad C_c = 0.55$$

donde “ C_c ” es el coeficiente de contracción, “ r ” es la porosidad relativa de la pared perforada y “ α ” es el coeficiente de disipación. La pérdida lineal de carga a lo largo de la pared perforada (“ β ”), dependiente de “ α ” y del oleaje a ambos lados de la pared, se considera constante a cualquier profundidad.

El método plantea la linealización del problema mediante $4N+2$ ecuaciones, donde el coeficiente lineal de disipación “ β ” es dependiente de las incógnitas. Por lo tanto, el sistema de ecuaciones es implícito y su resolución es posible mediante métodos iterativos como Newton-Raphson multidimensional.

El empleo de diques verticales perforados de una sola cámara presenta una sensibilidad muy alta a la longitud de onda incidente, de modo que sólo es eficiente (bajo coeficiente de reflexión) para un estrecho rango de periodos o longitudes de onda (Figura 4). Además, dadas las longitudes de onda de los oleajes extremales, se requieren anchos de cajón muy grandes para mantener la relación B/L cercana a 0.25.

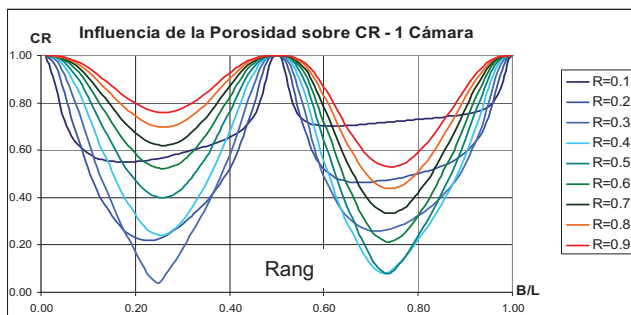


Figura 4.- Influencia de la porosidad sobre el Coeficiente de Reflexión con una cámara.

El diseño de diques perforados de varias cámaras permite ampliar el rango de longitudes de onda para las cuales el coeficiente de reflexión se considera bajo (Figura 5 y 6). De este modo, la eficiencia de esta tipología de diques verticales se ve mejorada significativamente y su aplicación al diseño de obras de abrigo es muy interesante.

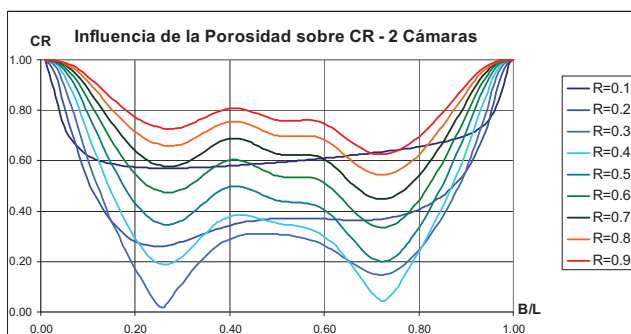


Figura 5.- Influencia de la porosidad sobre el coeficiente de reflexión con dos cámaras

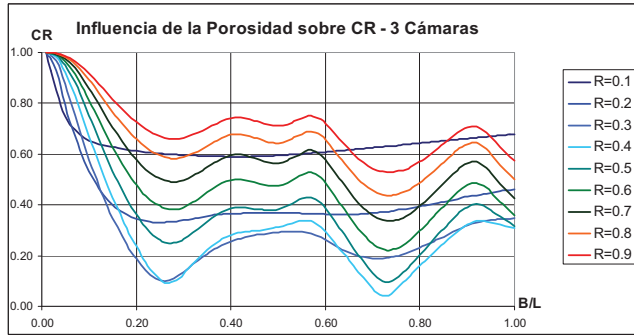


Figura 6.- Influencia de la porosidad sobre el coeficiente de reflexión con tres cámaras

Comparación de los resultados experimentales con el modelo teórico

En la tipología de dique vertical antirreflejante de una sola cámara, es decir, el original dique tipo Jarlan, se han comparado los valores del CR estimado por el método LASA a partir de los registros medidos en el ensayo, con los valores de CR que se obtienen de aplicar la fórmula de F&N.

El resultado para dos porosidades diferentes (triángulo para porosidad 0.35 y círculo para porosidad 0.26) se muestra en la figura 7, en la que se aprecia que el CR experimental está por debajo del teórico, por lo que podría concluirse que, si bien la tendencia es similar, el modelo teórico está sobredimensionando la reflectividad de la estructura para los ensayos descritos.

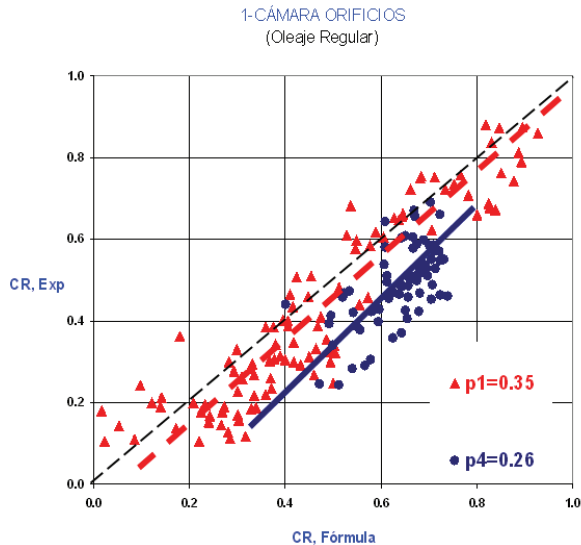


Figura 7. CR calculado con F&N respecto del CR experimental

Resultados experimentales

Los gráficos de los resultados experimentales muestran la relación existente entre el ancho relativo, B/L , y el coeficiente de reflexión, CR , estimado por el método LASA a partir de los registros experimentales. En el caso de oleaje regular, tanto la altura de ola media como la longitud de ola, se corresponden con el oleaje incidente estimado a partir de los registros de medida situados en la zona próxima al modelo. Del mismo modo, los resultados de los parámetros de oleaje irregular se corresponden con el tren de ondas incidente estimado a partir de los registros de medida situados en la zona próxima al modelo. En todas las figuras aparecen los valores de CR correspondientes al oleaje regular y al oleaje irregular.

La figura 8 muestra los resultados experimentales obtenidos para la tipología de dique vertical antirreflejante con cajón de una cámara y frontal perforado de orificios. En ellos se observa que existe un rango de $0.1 < B/L < 0.3$ para el que los valores de CR se sitúan por debajo del 40% en el caso de $p=0.35$ pero aumentan hasta valores del 50% si el índice de poros se reduce.

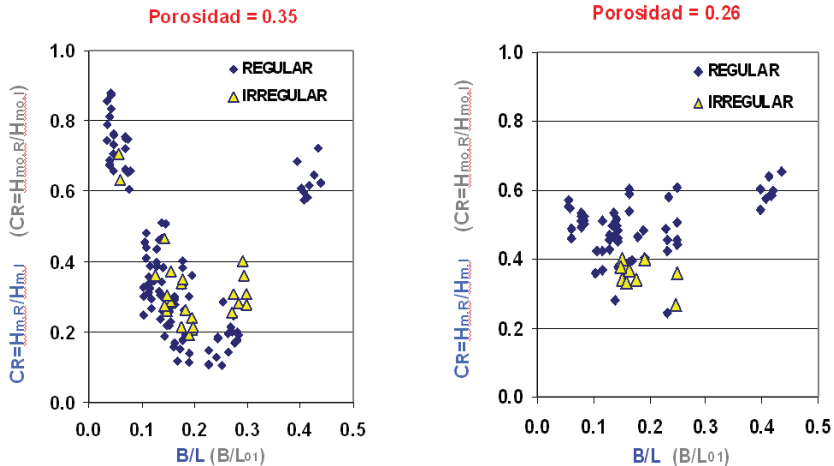


Figura 8. Cajón de 1-CÁMARA con ORIFICIOS

La figura 9 muestra los resultados experimentales obtenidos para la tipología de dique vertical antirreflejante con cajón de doble y triple cámara y frontales perforados de orificios, siendo las porosidades $p_1 = 0.35$, $p_4 = 0.26$ y $p_5 = 0.13$. Algunas de las conclusiones que se extraen son que en ambos casos, doble y triple cámara, el CR se ve reducido para un rango mayor de B/L respecto del caso de cajón de una cámara. Además, el cajón de tres cámaras consigue CR inferiores al de dos cámaras, por lo que su capacidad de disipación de energía del oleaje es, en general, mayor.

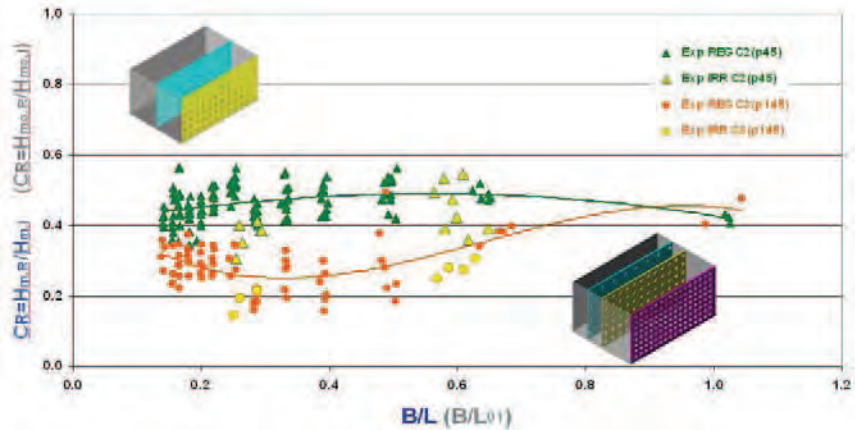


Figura 9. Cajón de 2-CÁMARAS y 3-CÁMARAS con ORIFICIOS

La figura 10 muestra los resultados experimentales obtenidos para la tipología de dique vertical antirreflejante con cajón de una cámara y frontal perforado de ranuras. En ellos se observa que existe un rango de $0.1 < B/L < 0.35$ para el que los valores de CR se sitúan por debajo del 40% en el caso de $r1=0.37$ y los valores mínimos de CR son aún menores para el caso de $r2=0.25$. De estos resultados se puede deducir que el tipo de frontal perforado con ranuras ofrece una mayor efectividad en la reducción de reflexión del oleaje que el tipo de frontal perforado con orificios para las porosidades ensayadas.

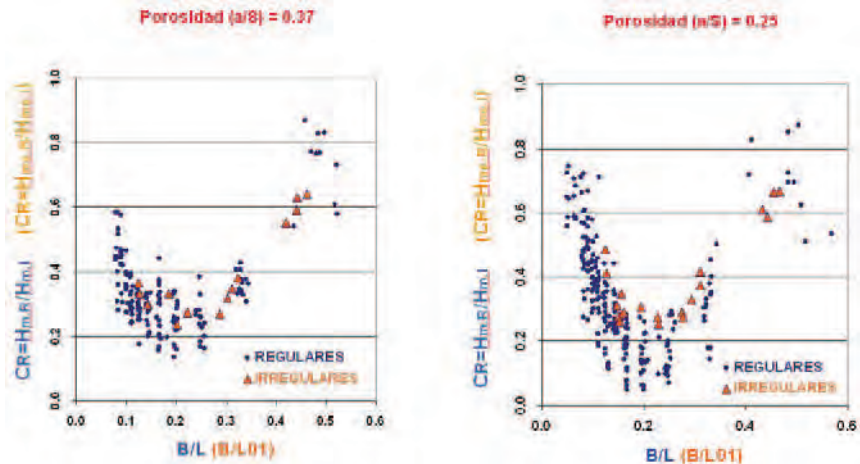


Figura 10. CR Cajón de 1-CÁMARA con RANURAS

La figura 11 muestra los resultados experimentales obtenidos para la tipología de dique vertical antirreflejante con cajón de doble y triple cámara y frontales perforados de

ranuras, siendo las porosidades $r_1 = 0.37$, $r_2 = 0.25$ y $r_3 = 0.18$. Algunas de las conclusiones que se extraen son que en ambos casos, doble y triple cámara, el CR se ve reducido para un rango mayor de B/L respecto del caso de cajón de una cámara. Además, el cajón de tres cámaras consigue CR inferiores al de dos cámaras. Por otro lado, vuelve a verificarse que la tipología de cajón multi-cámara con frontales ranurados aumenta la disipación de energía con respecto al frontal de orificios.

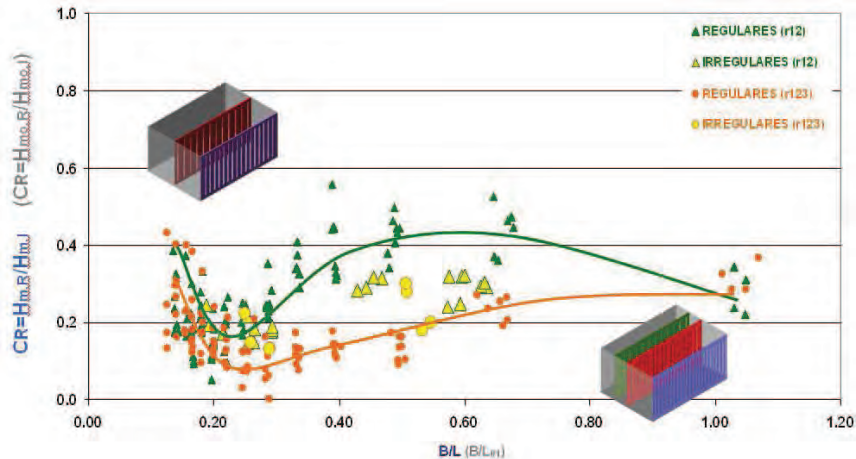


Figura 11. Cajón de 2-CÁMARAS y 3-CÁMARAS con RANURAS

CONCLUSIONES

En el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV) se han llevado a cabo ensayos de oleaje regular e irregular para el estudio de la reflexión del oleaje en diques verticales antirreflejantes tipo Jarlan de una, dos y tres cámaras de diferentes anchuras, con dos tipologías de paredes frontales perforadas, una con orificios circulares y otras con ranuras verticales de cuatro porosidades diferentes.

Se ha constatado que el modelo teórico de F&N, aplicado al caso de cajón con una cámara, ofrece valores del coeficiente de reflexión superiores a los estimados mediante el método LASA a partir de los resultados experimentales. Además, se verifica la significativa influencia de la anchura relativa del cajón, siendo mínimo el coeficiente de reflexión para $B/L \approx 0.2$, así como la mayor efectividad en la reducción de reflexiones de los diques de dos y tres cámaras ($CR < 0.5$ para amplio rango de frecuencias) respecto de los diques de una cámara. Por otro lado, las paredes perforadas con ranuras parecen mostrar una mayor efectividad que las perforadas con orificios en cuanto a lo que se refiere la reducción de la reflexión en el dique antirreflejante tipo Jarlan.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Cristina Pellejero y Dieter Vanneste por su colaboración en los ensayos, así como el soporte económico proporcionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto MUDIVAR REN2002-02951).

REFERENCIAS

- Baquerizo, A., Losada, M.A., Smith, J.M., and Kobayashi, N. (1997). "Cross-shore variations of wave reflection from beaches" *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, ASCE, 123(5), 274-279.
- Bergmann, H. et al. (2000) "Wave loads on perforated caisson breakwaters" *Proc. Coastal Engineering*, 2, pp. 1622-1635
- Dhinakaran, G. et al. (2002) "Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves" *Ocean Engineering*, 29, pp.1981-2004
- Figueres, M. Garrido, J.M. y Medina, J.R. (2003). "Cristalización simulada para el análisis de oleaje incidente y reflejado con un modelo de onda Stokes-V". VII Jornadas de Costas y Puertos, Almería.
- Figueres, M. and Medina, J.R. (2004). "Estimation of Incident and Reflected Waves using a Fully Non-Linear Wave Model." *Proc. ICCE 2004*, pp. 594-603
- Franco, L., 1994. Vertical breakwaters: the Italian experience. *Coastal Engineering*, 22, 31-55.
- Fugazza M. , Natale L. (1992), "Hydraulic performance of perforated breakwater", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng.*, ASCE 118, pp. 1-14
- Hagiwara K. (1984). "Analysis of upright structure for wave dissipation using integral equation", *Proc. 19th Coastal Engineering Conference*, ASCE, pp. 2810-2826.
- Jarlan G.E.(1961) , "A perforated vertical breakwater" , *The Dock and Harbour Authority*, Vol.41 n°486, pp. 394-398
- Jarlan G.E. (1965) , "The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures" *Quart. Bulletin, National Research Council Canada*, pp. 23-64
- Jianyi, W. (1992) "Experimental study of perforated caisson breakwater", *China Ocean Engineering*, 6, pp. 65-78
- Kakuno S. , Tsujimoto G. , Shiozaki Y. (2003), "A design method for double slit-wall breakwaters", *Coastal structures 2003*, pp. 295-304
- Kondo H. (1979), "Analysis of breakwaters having two porous walls", *Int. Proc. Coastal Structures 1979*, Vol. 2, pp.962-977
- Marks, W and Jarlan G.E. (1968) "Experimental studies on a fixed perforated breakwaters" *Coastal Engineering*, 68, pp. 1121-1140
- Medina, J.R., 2001. "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 127, pp. 213-221.
- Suh K.D., Park W.S. (1995). "Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters" , *Coastal Engineering* 26, pp. 177-193
- Suh, K.D. et al. (2006) "Wave reflection from partially perforated-wall caisson breakwater" *Ocean Engineering*, Volume 33, Issue 2, pp. 264-280
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003) "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson" *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, Volume 129, Issue 1, pp. 34-40.
- Takahashi S. and Hosoyamada S. (1994), "Hydrodynamic characteristics of sloping-top caissons" *Proc. of Int. Conf. on Hydro-technical Eng. for Port and Harbour Construction*, PHRI, 1994
- Takahashi, S., 1996. Design of vertical breakwater, Reference Document, No. 34, Port and Harbour Research Institute, 85 p.
- Takahashi, S. et al. (2002) "Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations" *Proc. ICCE 2002*, ASCE, pp. 1365-1376.

**MODELO NEURONAL PARA ESTIMAR LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN
DIQUES VERTICALES ANTIRREFLEJANTES
J. M. Garrido¹ y J.R. Medina²**

²*Iberport Consulting S.A., Avda. Cardenal Benlloch, 14 46071 Valencia,
e-mail: jgarrido@iberport.com*

²*Laboratorio de Puertos y Costas, ETSICCP, Universidad Politécnica de Valencia,
Camino. de Vera, 14, 46071 Valencia, e-mails: jgarrido@tra.upv.es, jmedina@tra.upv.es*

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados experimentales de la reflexión del oleaje sobre diques verticales antirreflejantes tipo Jarlan con una, dos y tres cámaras, tanto para paredes perforadas con ranuras como con orificios. Se han obtenido En diques con cajón de una sola cámara muestran resultados de $CR < 40\%$ para rangos de ancho relativo, B/L , de 0.1 a 0.3, similares a los obtenidos durante el proyecto PROVERBS. Los resultados experimentales han sido comparados con la fórmula de Fugazza and Natale (1992) resultando que los resultados experimentales son sobrestimados. Se proponen modelos de Redes Neuronales (RN) para describir las relaciones no-lineales observadas entre CR y las variables estructurales y de oleaje para cajones de paredes perforadas y ranuradas, obteniéndose errores medios cuadráticos relativos (MSE/Var) menores del 6% para predecir la respuesta de la estructura frente al oleaje incidente. Como resultado de la investigación, se presentan nuevas tipologías de diques y piezas para muelles con capacidad antirreflejante.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas se ha experimentado un importante desarrollo del comercio internacional y del transporte marítimo, lo que se ha visto reflejado en el aumento constante del calado de los buques y la ampliación de los puertos hacia mayores profundidades, con el consiguiente empeoramiento de las condiciones del oleaje. Por otra parte, la ocupación por las ciudades de las dársenas interiores de los puertos, la escasez de materiales de cantera y los problemas ambientales derivados de la explotación de las mismas, así como la ampliación de la flota de cajoneros de las constructoras españolas, han propiciado el auge en el proyecto de diques verticales y de muelles de cajones en detrimento de los diques en talud, tipología que hasta ahora ha sido mayoritaria en la construcción de diques de abrigo en España. Además de estos condicionantes las estructuras de pared vertical presentan numerosas ventajas como son el mejor aprovechamiento del espacio marino, el ahorro económico en materiales y plazos de ejecución o la facilidad para el amarre de embarcaciones a lo largo del dique. Sin embargo, el dique vertical se caracteriza por la reflexión casi total de la energía del oleaje, hecho que en ocasiones invalida la solución con tipología vertical cuando la reflexión implica un aumento importante de las condiciones de agitación en el canal de entrada, antepuerto y dársenas interiores, así como, el aumento de la altura de ola máxima, con el consiguiente aumento de la erosión local, el rebase, los esfuerzos sobre el dique y el coste de la estructura. Para reducir la reflexión de los diques y muelles verticales se han desarrollado diques verticales y muelles de baja reflectividad, compuestos en su mayoría por cámaras huecas que permiten la entrada de agua en su interior a través de los huecos en las paredes de las mismas. Este tipo de estructuras marítimas están siendo adoptados por su capacidad de absorción de energía, la mayor estabilidad del cajón, la reducción del rebase, reducción de la erosión, reducción de fuerzas

sobretudo impulsivas (Takahashi and Hosoyamada, 1994) con el consecuente ahorro económico que ello supone.

Sin embargo, a pesar de lo variado de las tipologías y del uso cada vez más creciente de estas estructuras marítimas, el conocimiento de su complejo comportamiento hidráulico y de las fuerzas hidrodinámicas necesarias para su diseño es limitado. En este artículo se profundiza en el estudio experimental de las estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan en su relación con la reducción del coeficiente de reflexión y se comparan los resultados experimentales de ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universidad Politécnica de Valencia (LPC-UPV) con los obtenidos aplicando el modelo teórico de Fugazza and Natale (1991).

Disipación de la reflexión en diques verticales antirreflejantes

Las estructuras marítimas antirreflejantes se basan en el principio de las cámaras disipantes de energía mediante paredes perforadas sobre las que incide el oleaje que es parcialmente reflejado en el primer paramento frontal perforado y parcialmente transmitido dentro de la cámara o cámaras del dique para reflejarse posteriormente con un desfase que interfiere la primera reflexión en el paramento frontal. La disipación de energía es debida a la viscosidad del flujo a su paso por las perforaciones de la pared y a la interferencia entre ondas. Con una cámara, estas pérdidas dependen sobretudo del periodo del oleaje y de la distancia (B) entre el paramento frontal perforado y la pared posterior. La máxima pérdida de energía ocurrirá cuando la velocidad inducida por el oleaje sobre la pared sea máxima en la pared perforada: esto ocurrirá cuando la anchura de la cámara es aproximadamente un cuarto de la longitud de onda (L) en la cámara ($B \approx L/4$). Por el contrario, cuando la velocidad es pequeña, la pérdida de energía es baja pared perforada y cámara única es poco eficiente ($B \approx L/2$). Por lo tanto, existe una porosidad y dimensiones óptimas de la pared perforada y cámara para obtener una reflexión mínima. Por otra parte, se produce un efecto de disipación de energía en el interior de la cámara debida a otros factores, tales como la interacción de los chorros de agua procedentes de las aberturas de la pared perforada con el agua almacenada en la cámara y las turbulencias propias de éste. Además, podría considerarse el efecto de la diferencia de profundidades entre el interior y el exterior de la cámara como una causa más de disipación de energía. Todo ello, unido a las numerosas variables que intervienen en el proceso, tanto geométricas como características del oleaje, hace muy complejo el estudio del comportamiento del flujo en esta tipología de estructuras marítimas.

A partir de la idea original propuesta por Jarlan (1961, 1965) y la aplicación en Canadá (Comeau Bay, 1966) y en Japón (Kobe Port, 1969 y Takamatsu Port, 1970), son muchas las variedades que sobre éste se han venido realizando a lo largo de los años, especialmente en Japón (Takahashi, 1996), donde se han construido cajones tipo ranura, multi-cámara, planos, inclinados y curvados; o en Italia, donde se han instalado diques perforados en Porto Torres, Sardinia, Palermo y Sicilia (Franco, 1994). Entre las más usadas destacan los cajones de pared perforada para la construcción de diques verticales, las estructuras formadas por simples o múltiples pantallas con porosidad y espaciado variable y las piezas o bloques prefabricados para muelles. Típicamente, las paredes tienen ranuras verticales y horizontales u orificios circulares o rectangulares. La porosidad de la pared, definida como la relación entre el área perforada y el área total de pared, suele estar comprendida entre 15-40% y el ancho de la cámara, B, entre 1/10 y 1/4 de la longitud de onda local o en las proximidades del dique. A pesar de lo variado de las tipologías y del uso creciente de las estructuras marítimas antirreflejantes, el conocimiento a cerca de su complejo

comportamiento hidráulico y de las fuerzas hidrodinámicas necesarias para su diseño es limitado.

El primer estudio experimental importante de diques antirreflejantes puede atribuirse a Jarlan (1961) quien ensayó a escala 1:30 el cajón de una cámara y pared frontal perforada con orificios y porosidad 0.49. Como resultado encontró que la reducción de la reflexión era significativa para determinados valores de longitud de onda. Marks and Jarlan (1968) realizaron ensayos con oleaje irregular y realizaron un análisis espectral para estudiar las características de las fuerzas. También observaron que la erosión producida en la base del cajón apoyado sobre fondo de arena con oleaje regular se reducía con pared perforada. Jianyi (1992) diseñó de un dique vertical tipo cajón perforado y realizó ensayos de modelo con oleaje regular e irregular que demostraron que el dique vertical tipo cajón perforado tiene ventajas de bajo coeficiente de reflexión, absorción del oleaje, disminución de la altura de ola y del rebase. Bergmann et al. (2000) compararon resultados de reflexión con diques de una sola cámara con cajones de varias cámaras y comprobaron la reducción de fuerzas sobre la estructura para un rango mayor de frecuencias que con una sola cámara. Dhinakaran et al. (2002) llevo a cabo ensayos físicos para estudiar el comportamiento hidráulico y las presiones de una tipología de dique semicircular consistente en un dique mixto de cajón semicircular sobre escollera obteniendo que las fuerzas horizontales eran pequeñas comparadas con las verticales y se ven reducidas considerablemente debido a la curvatura de la pared comparadas con las de un dique vertical. Tabet-Aoul and Lambert (2003) realizaron ensayos dentro del proyecto europeo PROVERBS y propusieron un método empírico para el cálculo de máximas fuerzas horizontales desarrollado a partir de los resultados de los ensayos y testado con los datos existentes en prototipo. Garrido et al. (2005) realizaron un completo estudio experimental de reflexión para la tipología Jarlan, ampliado a dos y tres cámaras con perforaciones de orificios y ranuras, y los compararon con los resultados analíticos de Fugazza y Natale (1992).

En cuanto a modelos teóricos, Jarlan (1965) aplicó la teoría acústica a la reflexión del oleaje en estructuras marítimas. Kondo (1979) presentó una aproximación analítica para estimar el coeficiente de reflexión y transmisión para diques permeables e impermeables con 2 paredes perforadas de orificios. Hagiwara (1984) propuso un análisis teórico usando la ecuación integral derivada para las componentes desconocidas de la velocidad horizontal en la pared permeable para estimar el coeficiente de reflexión y de transmisión de estructuras verticales disipadoras del oleaje. También estudió la influencia de las características estructurales y del oleaje sobre la capacidad de disipación de un dique con pared permeable a ambos lados, mar y tierra. Fugazza and Natale (1992) analizaron la atenuación del oleaje producida por una estructura permeable y propusieron una fórmula para optimizar el diseño hidráulico de los diques tipo Jarlan. Suh and Park (1995) desarrollaron un modelo para predecir el coeficiente de reflexión de un dique vertical perforado que es cimentado sobre escollera con oleaje direccional. Takahashi et al. (2002) aplican el método numérico VOF para el estudio de la reflexión en un cajón perforado. Kakuno et al. (2003) aplicó un procedimiento de diseño basado en el método numérico BIM (Boundary Integral Method) cuyo objetivo fue alcanzar un coeficiente de reflexión máximo del 40% en un amplio rango de frecuencias mediante diseño de doble pantalla ranurada. Suh et al. (2006) describen como aplicar el modelo analítico desarrollado por Suh and Park (1995) a un dique vertical parcialmente perforado y con oleaje irregular, mientras que Garrido and Medina (2006) aplicaron la metodología de las Redes Neuronales para obtener modelos de ajuste que relacionen las variables de oleaje y geométricas con el coeficiente de reflexión (CR) a partir de resultados experimentales de diversas tipologías Jarlan.

MODELO EXPERIMENTAL

Los ensayos en modelo físico llevados a cabo se realizaron en canal de ensayos de oleaje del LPC-UPV generado mediante pistón de traslación accionado por un equipo hidráulico. El canal tiene 30 m de largo y una sección de 1.2 m x 1.2 m, con un falso fondo que se eleva 0.25 metros para la recirculación del agua y permite la generación de oleaje a una profundidad mayor que en la zona del modelo. (Fig. 1)

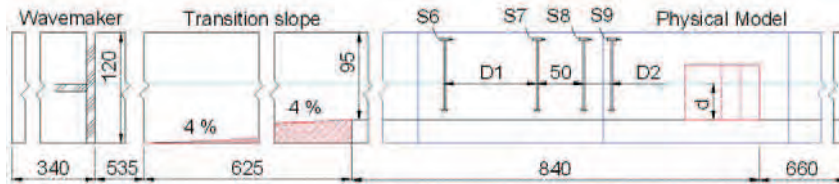


Figura 1.- Sección longitudinal del canal de ensayos del LPC-UPV.

Donde se realizaron 1200 ensayos con oleaje monocromático y 80 ensayos con oleaje irregular para cajones con paredes perforadas de orificios para cajones con paredes perforadas de orificios (Fig. 2) y 600 ensayos con oleaje monocromático y 80 ensayos con oleaje irregular para cajones con paredes perforadas de ranuras (Fig. 3). Para cada tipología se ensayaron diferentes anchos de cámara [$20 < B(\text{cm}) < 60$] y diferentes porosidades en las paredes perforadas: $0.05 < p(A_p/A_t) < 0.35$ para orificios y $0.2 < r(A_p/A_t) < 0.5$ para ranuras. Los ensayos de oleaje monocromático se hicieron para un rango de altura de ola de $0.04 < H(\text{m}) < 0.16$ y periodos en el rango de $0.6 < T(\text{s}) < 3.5$. Los ensayos con oleaje irregular se realizaron para Alturas de ola significativa en el rango de $0.04 < H_s(\text{m}) < 0.15$ y periodo de pico en el rango de $1 < T_p(\text{s}) < 2.5$.

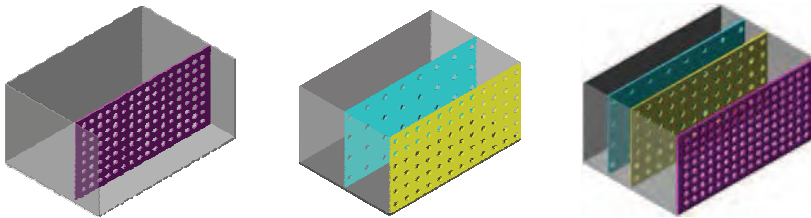


Figura 2.- Cajones perforados de orificios

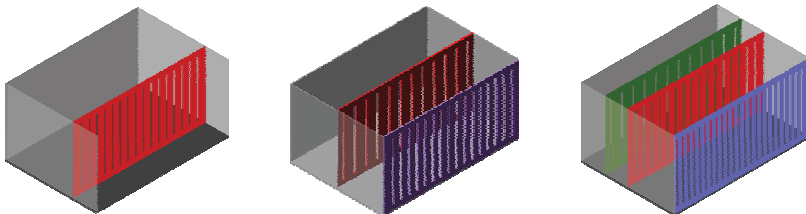


Figura 3.- Cajones perforados de ranuras.

Para estimar el valor del CR se ha usado el método LASA (Medina, 2001) de separación de oleaje incidente y reflejado no-lineal y no-estacionario.

Comparación de los resultados experimentales y los del modelo analítico

Fugazza and Natale (1992), en adelante F&N, propusieron una solución analítica para el cálculo de la reflexión de diques verticales tipo Jarlan multi-cámara. El modelo F&N asume las hipótesis de oleaje monocromático, cresta larga, pequeña amplitud de onda y oleaje de incidencia normal y profundidad de agua igual dentro y fuera de la cámara. El método F&N fue calibrado con los experimentos de oleaje regular de Liberatore (1974) and Kondo (1979) y los de oleaje irregular de Sawaragi and Iwata (1979).

Las condiciones del modelo F&N permiten aplicarlo a los resultados experimentales obtenidos por Garrido et al. (2005) correspondientes a los ensayos regulares. Así pues, en la Figura 4 se compara el CR estimado por el modelo F&N y los CR medidos para pared perforada con orificios en cajón de doble cámara y dos pares de porosidades distintas.

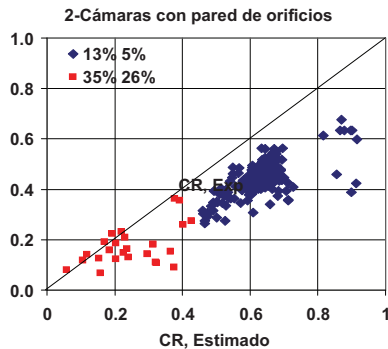


Figura 4.- Comparación del CR experimental y el CR estimado por el modelo F&N para dos cámaras perforadas de orificios.

En la Figura 5 se compara el CR estimado por el modelo F&N a partir de los datos de entrada experimentales y el CR medido en cajón de una cámara con pared perforada de ranuras y porosidades de 20% a 50%.

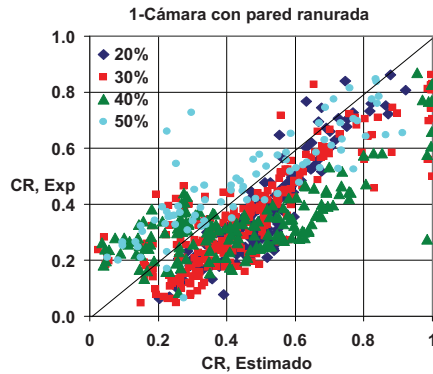


Figura 5.- Comparación de CR estimado por el modelo F&N y el CR experimental en cajón de una cámara con pared ranurada.

Se puede observar, tras la comparación de resultados experimentales y analíticos que este modelo tiene tendencia a sobreestimar el CR, no obstante, la estimación de CR obtenida con el modelo F&N es razonable para las dos tipologías de perforación ensayadas, por lo que, se puede concluir que los experimentos realizados durante el presente trabajo han sido satisfactorios y están dentro de lo esperable en comparación con trabajos anteriores.

A continuación, se presenta un resumen de todos los resultados experimentales obtenidos.

Resultados Experimentales

Los ensayos físicos con diques de pared perforada se llevaron a cabo considerando diferentes porosidades para paredes de orificios (Fig. 6) y para paredes ranuradas (Fig. 7) Se puede observar que el valor de CR es similar en ambos casos para porosidades similares y que el mínimo se obtiene para valores del 20 al 30 % de porosidad. En el caso de una sola cámara, CR es mas bajo del 40 % para un rango de ancho relativo de $0.1 < B/L < 0.3$.

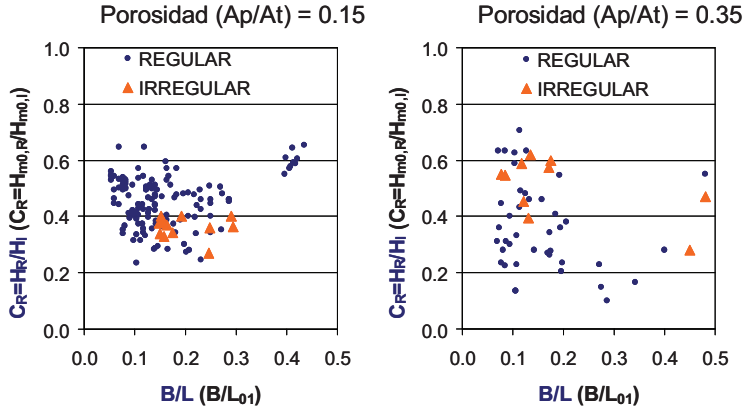


Figura 6.- CR experimental para cajón de una cámara con pared de orificios

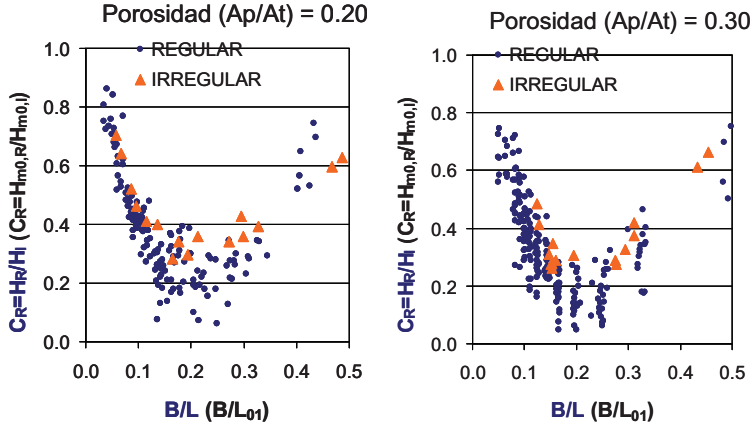


Figura 7.- CR experimental para cajón de una cámara con pared ranurada

Los ensayos realizados para cajones de 2 y 3 cámaras no muestran la relación típica entre CR y B/L que muestran los cajones de una cámara, sino que se mantiene un valor de CR menor en un mayor rango de B/L, siendo un fenómeno más acusado en el caso de cajones de triple cámara. Para valores de B/L mayores de 0.35, las cámaras múltiples reducen la reflexión mejor que las de una sola cámara. Las figuras 6 a 9 muestran los resultados experimentales obtenidos, tanto con oleaje regular como con oleaje irregular.

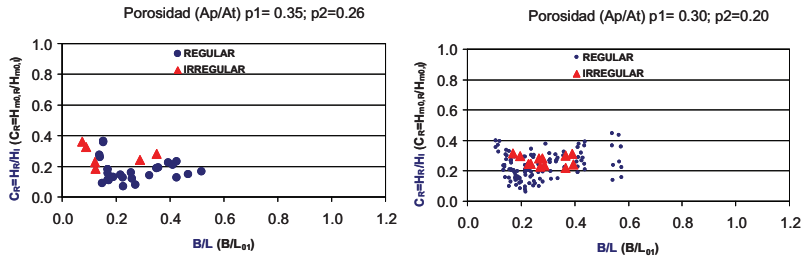


Figura 8.- CR experimental para cajones con 2 cámaras de pared con orificios y ranurada.

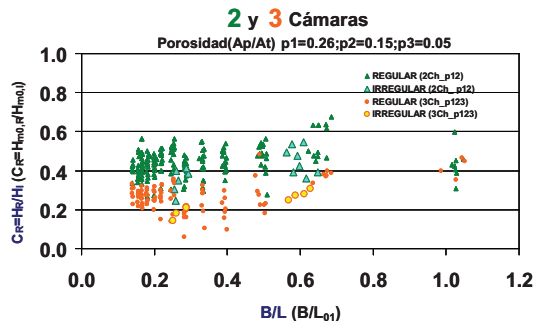


Figura 9.- CR experimental para cajones con 2 y 3 cámaras de pared con orificios.

MODELOS DE AJUSTE DE RESULTADOS CON REDES NEURONALES

Las Redes Neuronales (RN) están inspiradas en el funcionamiento del sistema nervioso de los animales y usan conceptos como neuronas, axon y uniones sinápticas en las cuales las relaciones entre las entradas y las salidas son establecidas mediante un modelo de RN. Las RN pueden ser consideradas como métodos de regresión multi-paramétricos y no-lineales capaces de capturar complejas relaciones y no-lineales entre las variables de entrada y de salida.

Se han propuesto numerosas aplicaciones basadas en algoritmos de aprendizaje tipo “backpropagation” para resolver problemas de ingeniería marítima. Medina et al. (2002) aplicó modelos de RN podadas optimizados mediante estrategias evolutivas para la estimación del rebase sobre diques en talud, o una metodología para reconstruir series temporales de variables de estados de mar (Medina and Serrano, 2004).

En esta aplicación, ha sido implementada la metodología de RN totalmente conexiónada de MATLAB Toolbox para modelar las relaciones no-lineales observadas entre CR y las condiciones estructurales y de oleaje de los ensayos sobre cajones con pared ranurada de una, dos y tres cámaras. La variable de salida es CR y las variables de entrada son las condiciones del oleaje (H, L, h) medidas en los experimentos y las variables de la estructura (B, porosidad) para cada modelo.

Los resultados que se muestran a continuación están referidos solo a cajones de dos cámaras con paredes ranuradas. El proceso de análisis ha sido similar para obtener los modelos neuronales del resto de tipologías. La relación entre CR y las variables adimensionales B/L, H/L, H/h, P1 y P2 han sido ajustada mediante el modelo RN que se muestra en la figura 10 a partir de los resultados de 307 ensayos que se utilizaron para la fase de entrenamiento y 73 ensayos para el testeo. El rango de validez del modelo se muestra en la Tabla 1.

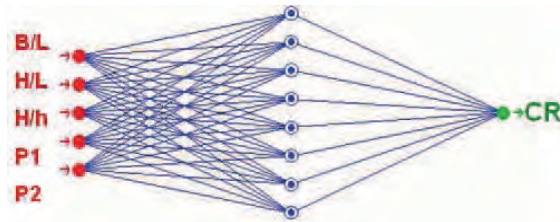


Figura 10.- Modelo de RN para cajón de dos cámaras ranurado

	B/L	H/L	H/h	Porosity (p)
max	1.048	0.088	0.463	0.4/0.3
min	0.103	0.003	0.037	0.3/0.2

Tabla 1.- Rango de validez del modelo RN para cajón de dos cámaras ranurado

El error cuadrático medio relativo (MSE/Var) se situó por debajo del 6% (Fig. 11), por lo que el modelo de RN para cajón de dos cámaras ranuradas puede considerarse un modelo razonable para estimar el CR correspondiente a esta tipología.

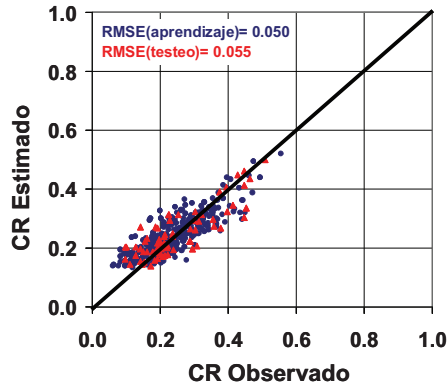


Figura 11.- Comparación del CR observado experimentalmente y CR estimado por el modelo de RN para cajón de dos cámaras ranurado.

Los modelos de RN pueden también ser usados como simuladores de un canal de oleaje virtual al objeto de obtener resultados de ensayos virtuales. Realizando esta práctica para el modelo de RN para cajón de una sola cámara ranurado, se ha obtenido el CR en un rango B/L de 0 to 1.0; H/L fijado en H/L=0.01, 0.03, 0.05, 0.07 y 0.09; H/h fue fijado para H/h= 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5, y las porosidades de $r=0.2, 0.3, 0.4$. La Figura 11 muestra los resultados del caso concreto de $H/h = 0.4$ y $H/L = 0.07$, que resultan ser similares a los obtenidos mediante la fórmula de PROVERBS, que depende solo de B/L.

$H/h=0.4; H/L=0.07$

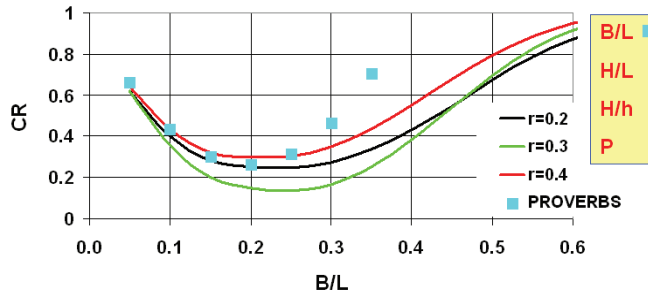


Figura 12.- Estimación de CR con el modelo RN para cajón de una cámara ranurada

Del mismo modo, los modelos RN obtenidos del ajuste para cajón con dos y tres cámaras ranuradas, han permitido realizar simulaciones de ensayos virtuales para obtener el CR de casos particulares no detectados tras el análisis experimental. La Figura 13 muestra los resultados de un caso particular en el que $H/h = 0.4$ y $H/L = 0.07$.

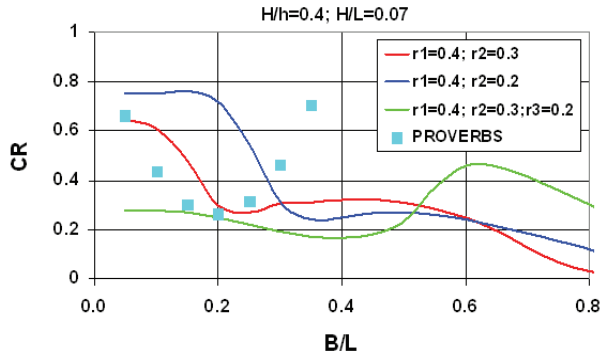


Figura 13.- Estimación del modelo RN para cajón de dos y tres cámaras ranuradas.

NUEVAS TIPOLOGÍAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE DIQUES Y MUELLES ANTIRREFLEJANTES

Tras el estudio de la reflexión en diques tipo Jarlan convencionales se llega a la conclusión de que este tipo de estructuras marítimas tienen limitaciones en cuanto a que la disipación de la energía del oleaje depende, fundamentalmente, del ancho relativo de la cámara, por lo que solo son válidas para un rango reducido de frecuencias del oleaje. Para tratar de solventar esta limitación, se presenta un nuevo concepto de cámara antirreflejante que puede ser aplicada tanto a diques como a muelles.

Se trata de una cámara cuya forma circular, hueca y con aperturas permite el retardo en la salida del agua y, en consecuencia, el aumento de la efectividad disipadora en un mayor rango de frecuencias del oleaje. Además, es posible contar con la tipología de doble cámara perforada. La invención tiene solicitud de patente tanto para diques (Fig. 14) como para muelles (Fig. 15).

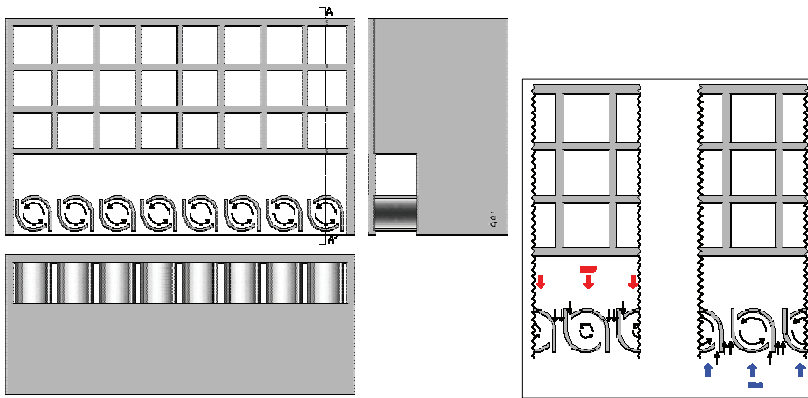


Figura 14.- Nueva tipología de dique vertical antirreflejante

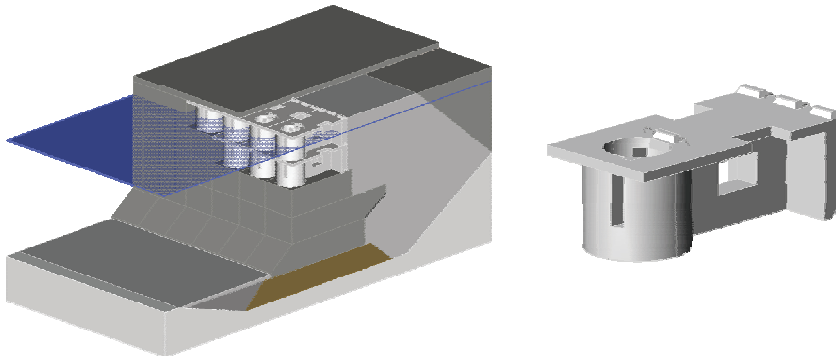


Figura 15.- Nueva tipología de pieza para muelle antirreflejante

CONCLUSIONES

En este artículo, se ha medido el CR de los ensayos de oleaje realizados para diferentes tipologías de dique tipo Jarlan. Un total de 1800 ensayos regulares y 160 irregulares fueron llevados a cabo en el canal de oleaje del LPC-UPV tanto para cajones con una, dos y tres cámaras con paredes, tanto perforadas como ranuradas. Los resultados obtenidos de los experimentos han sido ajustados a modelos de RN de MATLAB Neural Network Toolbox y comparados con el modelo analítico de F&N. Para una cámara, los resultados del CR observado se ajusta de manera cualitativa a los obtenidos del modelo numérico de F&N, aunque se aprecia una clara sobreestimación del CR por parte de esta fórmula. Por otro

lado, el cajón de una cámara muestra $CR < 40\%$ en el rango $0.1 < B/L < 0.3$, similar al CR estimado mediante la fórmula de PROVERBS.

La metodología de RN para modelar las relaciones no-lineales entre las variables del oleaje y estructurales y el CR han producido resultados satisfactorios ($MSE/Var < 6\%$), por lo que se han usado los modelos RN obtenidos para cada tipología como simulador de CR en casos de tipologías similares a las modelizadas. Además, la aplicación de la metodología neuronal muestra que el CR tiene una importante dependencia de la porosidad de la tercera pared de la cámara en el caso de cajón con tres cámaras ranuradas.

Por último, se proponen nuevos conceptos de cámaras antirreflejantes aplicables a la construcción de diques y muelles antirreflejantes que amplíen la efectividad disipadora de la tipología de cajón Jarlan a un mayor rango de frecuencias.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte económico proporcionado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto MUDIVAR REN2002-02951).

REFERENCIAS

- Bergmann, H. et al. (2000) "Wave loads on perforated caisson breakwaters". Proc. Coastal Engineering, 2, pp. 1622-1635.
- Dhinakaran, G. et al. (2002) "Dynamic pressures and forces exerted on impermeable and seaside perforated semicircular breakwaters due to regular waves". Ocean Engineering, 29, pp. 1981-2004.
- Fugazza, M. and Natale L. (1992) "Hydraulic performance of perforated breakwater". Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE 118, pp. 1-14.
- Garrido, J.M., Figueres, M. y Medina, J.R. "Estudio de la reflexión del oleaje en diques verticales antirreflejantes" VIII Jornadas de Costas y Puertos, Sitges 2005.
- Garrido, J.M. and Medina, J.R. "Study of reflection of perforated vertical breakwaters" ICCE 2006
- Jarlan, G.E. (1961) "A perforated vertical breakwater". The Dock and Harbour Authority, Vol. 41 n°486, pp. 394-398.
- Jarlan, G.E. (1965) "The application of acoustic theory to the reflective properties of coastal engineering structures". Quart. Bulletin, National Research Council Canada, pp. 23-64.
- Jianyi, W. (1992) "Experimental study of perforated caisson breakwaters". China Ocean Engineering, 6, pp. 65-78.
- Kakuno, S., Tsujimoto, G. and Shiozaki, Y. (2003), "A design method for double slit-wall breakwaters". Coastal structures 2003, pp. 295-304.
- Kondo, H. (1979) "Analysis of breakwaters having two porous walls". Proc. Coastal Structures 1979, Vol. 2, pp. 962-977.
- Liberatore, L. (1974) "Experimental investigation on wave-induced forces on Jarlan-type perforated breakwaters". Atti. Del XIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, Italy, pp. 101-109.
- Marks, W. and Jarlan, G.E. (1968) "Experimental studies on a fixed perforated breakwaters". Coastal Engineering, 68, pp. 1121-1140.
- Medina, J.R. (1999) "Neural network modeling of runup and overtopping". Coastal Structures'99. Vol. 1, pp. 421-429. A.A. Balkema.
- Medina, J.R., (2001) "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing". Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 127, pp. 213-221.

- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M. and De Rouck, J. (2002) "Overtopping analysis using neural networks". Proc. ICCE 2002, ASCE, pp. 2165-2177.
- Medina, J.R. y Serrano-Hidalgo, O. (2004) "Interpolation of Time Series of Sea State Variables Using Neural Networks". Proc. ICCE 2004, pp. 985-996
- Moody, J.E. (1992) "The effective number of parameters: An analysis of generalization and regularization in nonlinear learning systems". In J.E. Moody, S.J. Hanson and R.P. Lippmann (eds.), *Advances in Neural Information Processing Systems 4*, pp. 847-854. San Mateo California: Morgan Kaufmann Publishers.
- Sawaragi, T. and Igwata, K. (1979) "Irregular wave attenuation of a vertical breakwater with two air chambers". Coastal Engineering in Japan, 21, pp. 63-74.
- Suh, K.D., Park W.S. (1995) "Wave reflection from perforated-wall caisson breakwaters". Coastal Engineering 26, pp. 177-193.
- Tabet-Aoul, E. and Lambert, E. (2003) "Tentative new formula for maximum horizontal wave forces acting on perforated breakwater caisson". J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., Volume 129, Issue 1, pp. 34-40.
- Takahashi, S., (1996) "Design of vertical breakwaters". Reference Document, No. 34, Port and Harbour Research Institute, 85 p.
- Takahashi, S. et al. (2002) "Performance evaluation of perforated-wall caissons by VOF numerical simulations". Proc. ICCE 2002, ASCE, pp. 1365-1376.
- Van Gent, M.R.A. and Van den Boogaard H.F.P. (1998) "Neural network and numerical modelling of forces on vertical structures". Proc. ICCE'98, ASCE, pp. 2096-2109.

MUELLE ANTIRREFLEJANTE DE TABLESTACAS PARA LA AMPLIACIÓN DEL PUERTO DE CULLERA

J.M. Garrido¹, D. Ponce de León¹, A. Berruguete¹, J.M. Calpe², O. Molines³ y V. Ibarra⁴.

1. Iberport Consulting, S.A. Avda. Cardenal Benlloch, 75-1º CP 46021. Valencia.
2. Arin Consultores, S.L. C/ Mariano Benlliure 69, 71 CP 46100. Burjassot, Valencia.
3. Planeamiento Vial 7, S.L. Valencia.
4. Dirección General de Puertos, Aeropuertos y Costas. Generalitat Valenciana.

INTRODUCCIÓN

El puerto de Cullera es un puerto fluvial que se sitúa en el cauce del río Júcar, en la provincia de Valencia. La reciente construcción del puente de la Vega impone unas condiciones de gálibo limitado (10 m) para la navegación fluvial del cauce (Fig. 1).

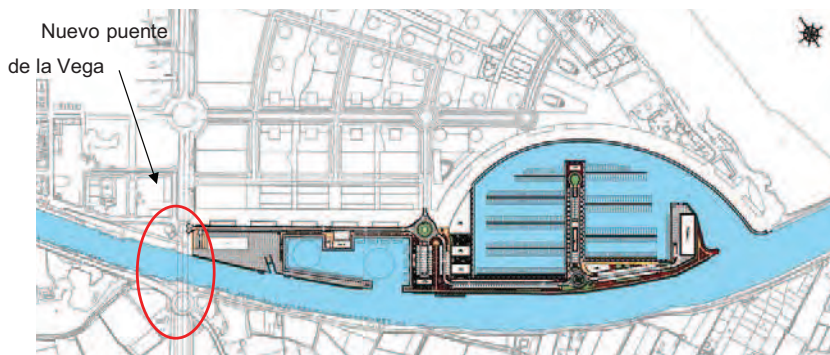


Figura 1.- Plano de planta del proyecto de ampliación del Puerto de Cullera.

Por otro lado, en la actualidad las actividades en el Puerto de Cullera del sector pesquero, que cuenta con 64 embarcaciones de trasmallo y arrastre, y el deportivo, que cuenta con 176 embarcaciones inferiores a los 12 m. de eslora, se desarrollan en las márgenes del río Júcar, con evidentes limitaciones de espacio y medios (Fig. 2).



Figura 2.- Situación actual de instalaciones del Puerto de Cullera en la margen del río Júcar.

Es necesario, por todo ello, una reordenación y ampliación de las instalaciones portuarias existentes aguas abajo de dicho puente.

Las instalaciones que se proyectan de la futura ampliación del puerto de Cullera se encuentran situadas a 2,5 kms. De la desembocadura del río Júcar, están delimitadas por el cauce del río Júcar por el sur, por la urbanización correspondiente al Plan parcial de Mejora del Sector NPR-5 “Vega - Puerto” por el norte y por el este, próximos a la playa de San Antonio, y, mínimamente, por la Avenida de Joan Fuster del casco urbano de Cullera por el oeste. Se trata por tanto de un puerto integrado en el casco urbano de la ciudad.

Se dividen en dos zonas, una pesquera y otra deportiva: En la zona pesquera se obtiene superficie total de 41.720 m², de los que 17.530 m² son de agua y 24.190 m² de tierra y una cota de calado de explotación de -4,50 m. respecto del NMMA, teniendo en cuenta que el máximo calado de los barcos es 3,0 m. (Fig.3)



Figura 3.- Zona pesquera

En la zona deportiva (Fig. 4), de los de 137.339 m² de superficie total de la instalación portuaria deportiva, 91182 m² se destinan a la superficie de agua abrigada y unos 46157 m² a superficie de tierra, lo que supone un 50 % de la superficie de agua. En total se dispondrá de unos 550 amarres de esloras comprendidas entre 15 m. y 8 m. La cota de calado de explotación de -3,50 m., respecto del NMMA, teniendo en cuenta que el calado máximo del barco es de 2,3 m., correspondiente a la embarcación de eslora L =15 m. Al igual que en la zona pesquera, la cota de coronación de los muelles se fija en +1,5 m.

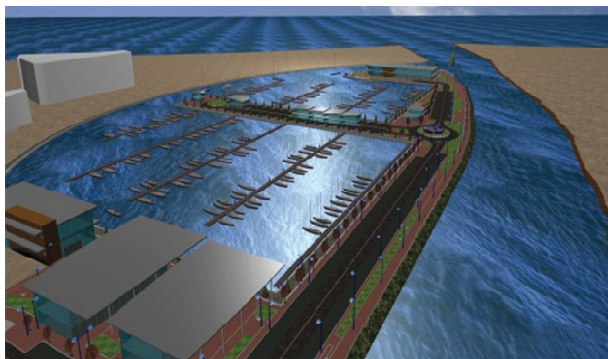


Figura 4.- Zona deportiva

CONDICIONANTES DEL PROYECTO

Los criterios básicos de diseño de la obra marítima se fundamentan en las diferentes Recomendaciones de Obras Marítimas a las que afecta el proyecto, a los criterios o consideraciones de carácter técnico y ambiental surgidos con anterioridad a la redacción del Proyecto y a las indicaciones de la Dirección de Proyecto.

Los condicionantes considerados como más relevantes de cara al diseño de los muelles son tres:

- (1) *Tipo de terreno*: De los resultados del estudio geotécnico se obtiene que los niveles A y C son de baja capacidad portante, por lo que es necesario cimentar los muelles alcanzando niveles resistentes (Nivel D)

Estrato	Tipo de suelo	Largo plazo		E' [kPa]
		C' [kPa]	ϕ' [°]	
Nivel A	Limos arenosos	0,0	27	900
Nivel B	Arenas limosas uniformes	0,0	31	1500
Nivel C	Arcillas grisáceas	0,0	25	400
Nivel D	Arcillas margosas firmes	1,0	30	2000-2500
Nivel E	Arenas limosas cementadas	0,0	33	3000

SECCIÓN TIPO	Cota Superior de Nivel respecto del NMMA (m)				
	Superficie	A	B	C	D
Pesquero y carena	+1,1	+0,5	-0,6	-8,5	-13,9
Deportivo	+1,2	+0,7	-1,8	-10,8	-11,8
Paseo	+1,1	+0,2	-1,6	-10,3	-12,3
Margen y marina	+1,5	-0,5	-1,4	-7,3	-9,8

- (2) *Características antirreflejantes*: Según criterio de la Dirección del Proyecto, aplicada a todas las nuevas obras portuarias de competencia de la Generalitat Valenciana, las soluciones para la estructura marítima de los muelles tiene en cuenta la inclusión de características antirreflejantes que reduzcan posibles fenómenos de agitación y resonancia dentro de las dársenas derivados de los

Tema: Obras y Estructuras Marítimas

procesos de oleaje de ondas medias y largas, así como de las ondas cortas derivadas de las ondas de acompañamiento de barcos.

- (3) *Verificación de modos de fallo*: Además de las comprobaciones habituales de modos de fallo asociados a ELU, es un condicionante del proyecto preservar las estructuras de la corrosión y no permitir flechas en coronación superiores a 10 cm.

Atendiendo a los diferentes condicionantes técnicos planteados, junto con el objetivo de conseguir la alternativa de menor coste y mayor durabilidad, se opta por una solución de tablestacas en voladizo y cámara con talud interior de escollera.

DISEÑO DE MUELLE ANTIRREFLEJANTE DE TABLESTACAS

Para reducir la reflectividad, Jarlan (1961) introdujo el principio de las cámaras disipantes de energía mediante paredes frontales perforadas, desde entonces, son varias las tipologías, tanto de cajones como de piezas prefabricadas de hormigón, que suelen emplearse en los muelles de gravedad de instalaciones portuarias para conseguir absorber parte de la energía de las ondas.

La energía reflejada dependerá de las características del muelle cuyo diseño puede favorecer la reducción del coeficiente de reflexión. Desde un punto de vista práctico, cualquier estructura considerada eficaz para este propósito debe también considerar aspectos económicos, de construcción, de estabilidad y de mantenimiento que pueden hacer una estructura preferible a otra. De entre las diferentes alternativas consideradas para hacer de los muelles reflejantes, muelles con capacidad para absorber parte de la energía, se ha optado por una novedosa solución que incorpora la tipología de la cimentación profunda a base de tablestacas, que es requerida por las condiciones geotécnicas del terreno, con la sencillez constructiva y el abaratamiento de los costes, cumpliendo en todo caso con los condicionantes hidrodinámicos principales de antirreflexión.

Para el diseño hidrodinámico de la cámara antirreflejante que constituye la sección principal de los muelles, se han aplicado los criterios propuestos por Garrido y Medina (2006, 2007) que se resumen en las siguientes consideraciones (Fig. 5):

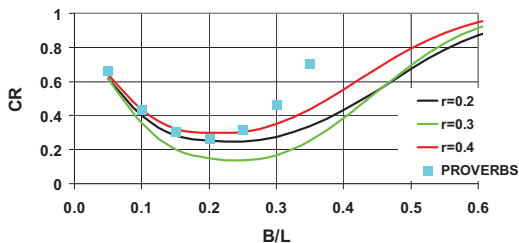


Figura 5.- Función de diseño hidrodinámico de cámara antirreflejante.

1) El ancho relativo de la cámara antirreflejante (B/L) ha de estar comprendido entre 0.1 y 0.4 para garantizar un valor del coeficiente de reflexión por debajo del 50% en muelles de una cámara con pared frontal ranurada.

2) La porosidad de la pared ranurada ha de estar comprendida entre 0,20 y 0,40, medida como la relación entre el área perforada y el total de área a considerar.

3) Para porosidades superiores al 0,40, es recomendable incluir escolleras en talud dentro de la cámara, siempre y cuando se garantice el ancho relativo óptimo medido este a nivel cero.

4) El espesor de la capa de escollera que forma el talud interior de la cámara ha de ser de al menos 2 capas para asegurar un coeficiente de reflexión inferior al 50%.

La ola de mayor entidad es la generada por el paso de los barcos y ésta no alcanza un periodo superior a 5 s., que a una profundidad de 3.5 a 4.5 m., según sea puerto deportivo o pesquero, la longitud de onda es aproximadamente 30 m., por lo que el valor del ancho de cámara podría estar comprendido, para asegurar una absorción del 50% de la energía, entre 3 y 12 m.

Teniendo en cuenta estos criterios se obtienen las siguientes características de diseño de la cámara:

- Cámara interior (d = 4,5 m)
- $H < 0,5$ m $d' = 1,5$ m

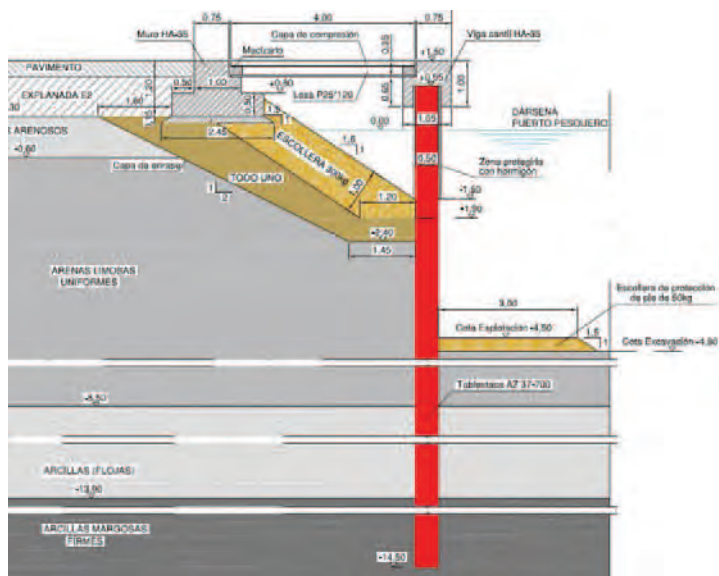


Figura 7.- Sección tipo de muelle para la zona pesquera con tablestacas en voladizo y cámara antirreflejante con talud de escollera

La cota de hinca es -13,5 m. para de muelle antirreflejante en la zona paseo del deportivo, -13,0 m. para muelle antirreflejante en la zona de muelle deportivo y -14,5 m. para muelle antirreflejante en la zona de muelle pesquero.

La escollera del talud interior de las cámaras es de 300 kg., al objeto de conseguir una mayor disipación del oleaje en periodos de onda mayores a 5 s., que sí son amortiguados por el ancho de 3,0 m. dado a la cámara en nivel medio.

La ranura de la parte superior de las tablestacas, obtenida tras el re-hincado de tablestacas intermedias hasta la cota -1,50 m. permite la creación de un frontal perforado superior desde la cota -1,5 m. a la cota +0,5 m. de porosidad 45% que, junto al ancho de cámara de unos 3 m., permite reducir el coeficiente de reflexión del muelle por debajo del 50% (Fig. 8).

Tema: Obras y Estructuras Marítimas

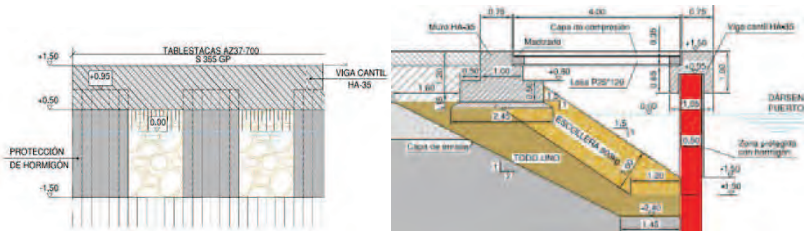


Figura 8.- Detalle de sección(d) y alzado(l) de la cámara antirreflejante.

Las tablestacas que quedan expuestas al aire se protegen con el recubrimiento de un semicilindro de hormigón (Fig. 9).

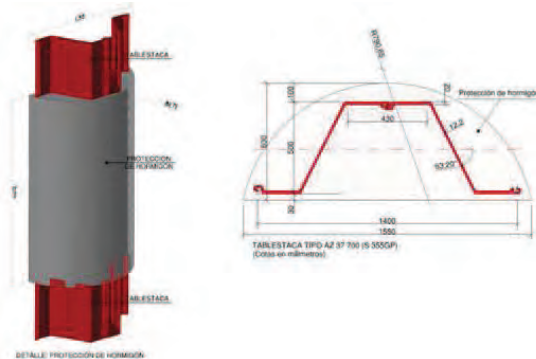


Figura 9.- Detalle de protección de hormigón de tablestacas

La viga cantil tiene 1 m. de ancho con espera de 0,25 m. y un canto de 1m. El armado, así como la geometría, se obtiene del cálculo. Sirve de “cosido” de las tablestacas y apoyo, junto con el muro posterior, a la losa prefabricada con capa de compresión que completa la superestructura.

La losa prefabricada para el muelle pesquero y deportivo es del tipo P25*120 o similar de 4,0 m. de ancho con capa de compresión de 0,08 m., según cálculo estructural.

El muro, de 1 m. de ancho superior y 1,20 de alto, es provisto de zapatas de 0,5m de alto y 2,0 m. de ancho inferior, asegurando así su estabilidad.

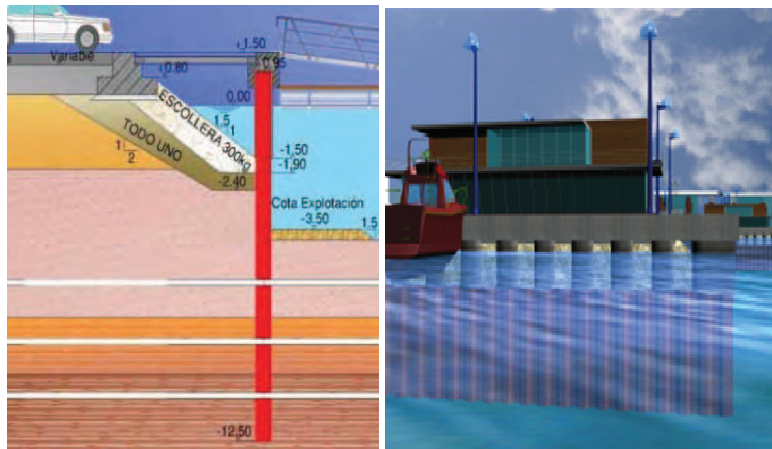


Figura 10.- Vista de la sección y alzado del muelle antirreflejante de tablestacas para el proyecto de Ampliación del Puerto de Cullera.

REFERENCIAS

- Jarlan, G.E., (1961) "A perforated vertical breakwater". The Dock and Harbour Authority, Vol. 41, No. 486, pp. 394-396.
- Garrido, J.M. and Medina, J.R. (2006) "Study of reflection of perforated vertical breakwaters". Proc. ICCE 2006 San Diego (USA), pp: 4325-4336 (V.5).
- Garrido, J.M. y Medina, J.R. (2007). "Modelo Neuronal para Estimar la Reflexión del Oleaje en Diques Verticales Antirreflejantes". Libro de ponencias de las IX Jornadas Españolas de Costas y Puertos.



① Número de publicación: **2 299 394**

② Número de solicitud: 200602955

⑤ Int. Cl.:
E02B 3/06 (2006.01)
E02B 3/14 (2006.01)

⑫ PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

② Fecha de presentación: 13.11.2006	⑦ Titular/es: Universidad Politécnica de Valencia CTT-Edif. 6G - Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, ES
④ Fecha de publicación de la solicitud: 16.05.2008	
Fecha de la concesión: 02.12.2009	⑦ Inventor/es: Garrido Checa, Joaquín de María; González Escriba, José Alberto y Medina Folgado, Josep Ramón
Fecha de modificación de las reivindicaciones: 13.10.2009	
④ Fecha de anuncio de la concesión: 17.12.2009	
④ Fecha de publicación del folleto de la patente: 17.12.2009	⑦ Agente: No consta

⑤ Título: **Elemento modular antirreflejante.**

⑤ Resumen:

Elemento modular antirreflejante.

Con muy pocos tipos de elementos modulares (2), se pueden formar bloques antirreflejantes de forma paralelepédica adecuados para sustituir las filas superiores de bloques macizos de los muelles de bloques convencionales y atenuar al reflexión del oleaje en una amplio rango de frecuencias. Las dimensiones típicas de los elementos modulares (2x2x1.5 metros) permiten formar bloques paralelepédicos antirreflejantes multicámara de 2xn metros de longitud adecuados para adaptarse a una amplia variedad de situaciones constructivas. Además de la aplicación típica en muelles de bloques, puede utilizarse también en defensas costeras y paseos marítimos, canales de navegación, contornos de dársenas y riberas del mar, lagos o ríos y otras aplicaciones en las que sea conveniente la reducción de la reflectividad de las estructuras frente al oleaje y otras oscilaciones del agua similares.

ES 2 299 394 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP.

DESCRIPCIÓN

Elemento modular antirreflejante.

Objeto de la invención

La presente solicitud de Patente de Invención tiene como objetivo principal la reducción de la reflectividad de los muelles para el atraque de embarcaciones, aunque puede utilizarse también en diques de abrigo, defensas costeras y paseos marítimos, canales de navegación, contornos de dársenas y riberas del mar, lagos o ríos y otras aplicaciones en las que sea conveniente la reducción de la reflectividad de las estructuras.

Concretamente, dicha disipación de energía se consigue en la presente invención mediante un elemento modular antirreflejante con pantalla frontal permeable que puede unirse a otros elementos modulares similares para formar un bloque conjunto paralelepípedo hueco con varias cámaras, adecuado para atenuar el oleaje en un amplio rango de frecuencias.

Antecedentes de la invención

Los muelles son estructuras para el atraque de embarcaciones, que generalmente ofrecen un paramento vertical muy reflejante al oleaje y oscilaciones del agua en la dársena o área de flotación en la que se encuentran. Para reducir la amplificación de la energía dentro de las zonas portuarias, áreas de navegación o espacios litorales es necesario reducir la reflectividad del contorno de las áreas de flotación o riberas utilizando tipologías poco reflejantes como taludes de escollera, -playas, muelles claraboya o muelles antirreflejantes.

El uso de tipologías antirreflejantes de muelles, especialmente las de bloques prefabricados para muelles de bloques, está siendo favorecida por la necesidad de reducir la agitación portuaria sin alterar mucho la morfología del muelle y sin la introducción de elementos granulares (arenas, gravas, bolos o escollera) dentro de los puertos. En los grandes puertos comerciales, la motivación es similar a la de los pequeños puertos pero los calados y el desplazamiento de los buques favorece la solución de cajones prefabricados, a los que también se podría aplicar una solución multicámara en la parte superior con bloques antirreflejantes semejante a la aplicada a los muelles de bloques para embarcaciones de menor calado.

Por consiguiente, una modificación estructural que permita reducir la reflectividad del muelle vertical y que permita, a la vez, el atraque de embarcaciones puede conducir a una mejora funcional con incremento de operatividad que permite un ahorro económico y beneficio ambiental considerable, ya que se reduce la agitación interior, las molestias a los usuarios y los posibles rebases y daños a embarcaciones en situación de temporal.

Para reducir la reflectividad de los muelles verticales de bloques se han propuesto a lo largo de los años una serie de modificaciones estructurales con diferentes características basadas en el diseño de bloques especiales con formas complejas que apilados o ensamblados frente al muelle forman un paramento antirreflejante que se caracteriza por tener un espacio hueco entre el paramento frontal y el trasero del tipo "dique Jarlan" (US3118282, 1964) consistente en establecer una cámara perforada frente al dique para disipar la energía del oleaje y desfasar el oleaje reflejado en la pared frontal permeable y en la pared trasera impermeable.

Con el nuevo elemento modular que se propone se pueden formar bloques antirreflejantes de diferentes longitudes y características hidráulicas adecuados para construir muelles y paramentos antirreflejantes con dos o más cámaras separadas con pantallas de diferente permeabilidad que resultan mucho más efectivas para reducir la reflectividad de la estructura en un mayor rango de frecuencias y con una notable simplificación en el proceso constructivo.

Descripción de la invención

La invención que a continuación se describe resuelve los inconvenientes antes señalados, pues se trata de un tipo de elemento modular con el que se pueden formar bloques para construir muelles verticales antirreflejantes y, en general, paramentos verticales de baja reflectividad frente al oleaje, a las ondas de acompañamiento y las oscilaciones del mar o fluviales, para un amplio rango de frecuencias y con una notable simplificación en el proceso constructivo.

Más concretamente, ésta consiste en unos elementos modulares paralelepípedos huecos que cuentan con un panel permeable situado en la cara frontal, susceptibles de unirse a otros similares por yuxtaposición, machihembrado u otro sistema convencional para formar un bloque antirreflejante de una o varias cámaras, el cual, a su vez, puede utilizarse para formar el paramento vertical frontal superior del muelle.

Además, el elemento modular puede tener aberturas tanto en las caras laterales como en la superior e inferior para conectar hidráulicamente con elementos modulares contiguos favoreciendo, igualmente, una mayor disipación de la energía del oleaje, siendo susceptible de presentar otro panel en su cara posterior, tanto permeable como impermeable, según sea necesario.

Los bloques estarán compuestos por un número determinado de elementos modulares antirreflejantes que formarán un sistema de cámaras múltiples antirreflejantes sin necesidad de construir dichas cámaras, a través del ensamblado de los elementos modulares antirreflejantes, que darán a los bloques un comportamiento antirreflejante mucho mejor que el de los formados por cámara única. Ello es debido a que el oleaje incidente se refleja parcialmente primero en el panel frontal permeable del primer elemento modular, luego en el panel o paneles permeables intermedios, formados por los paneles permeables frontales de los elementos modulares colocados a continuación del primero, y finalmente en el panel impermeable trasero, que será el panel posterior del último elemento modular.

La efectividad atenuadora de los elementos modulares objeto de la invención dependerá fundamentalmente de las dimensiones del elemento modular, del número de elementos modulares colocados en profundidad para formar los bloques antirreflejantes, del número de filas de bloques colocados en el muelle y de la permeabilidad de las pantallas de cada bloque antirreflejante.

La aplicación típica consiste en sustituir los bloques macizos superiores del muelle de bloques convencional por bloques antirreflejantes constituidos por varios elementos modulares alineados que forman cada bloque modular paralelepípedo de varias cámaras. De esta forma, se mantiene la mayor parte del proceso constructivo del muelle de bloques convencional y, con una ligera sustitución en el sumi-

nistro de bloques, se consigue formar un sistema de cámaras múltiples adecuado para atenuar oscilaciones similares a las del oleaje en un amplio rango de frecuencias.

Además, debido a las reducidas dimensiones de los elementos modulares, aproximadamente 2x2x1.5 m, éstos pueden ser manipulados y transportados con facilidad con medios terrestres convencionales. A esto se añade el hecho de que dada su sencilla estructura es posible obtener una gran eficiencia en la fase de prefabricación de cara a adaptar sus dimensiones a las necesidades constructivas y de respuesta al oleaje necesarias para el muelle en el cual van a ser instalados.

Otro aspecto a tener en cuenta es que si durante la construcción o después de la misma fuera conveniente, los bloques modulares pueden utilizarse también para formar bloques paralelepípedicos huecos o como encofrado perdido que se rellene *in situ* total o parcialmente con material granular u hormigón.

Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características del invento, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, de un juego de dibujos en donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1.- Muestra una vista en perspectiva de la aplicación típica de la invención para un muelle de bloques en el que algunos de los bloques macizos de las dos filas superiores han sido sustituidos por bloques de elementos modulares antirreflejantes.

La figura 2.- Muestra la sección transversal del muelle de bloques de la figura 1.

La figura 3.- Muestra la vista frontal del muelle de bloques de la figura 1.

La figura 4.- Muestra una vista en perspectiva de un elemento modular antirreflejante con panel frontal permeable ranurado y panel posterior impermeable.

La figura 5.- Muestra una vista en perspectiva de un elemento modular antirreflejante con panel frontal permeable ranurado y libre la cara posterior.

La figura 6.- Muestra una vista en perspectiva de un elemento modular antirreflejante con panel frontal ranurado desmontable y panel posterior impermeable desmontable.

La figura 7.- Muestra una vista en perspectiva de la colocación de dos elementos modulares antirreflejantes para formar un bloque antirreflejante de dos cámaras con panel frontal e intermedio permeable ranurado y panel posterior impermeable.

La figura 8.- Muestra una vista en perspectiva de la colocación de dos elementos modulares antirreflejantes para formar un bloque modular antirreflejante de dos cámaras con panel frontal e intermedio permeable ranurado y panel posterior impermeable.

La figura 9.- Muestra una vista en perspectiva de la colocación de dos elementos modulares antirreflejantes para formar un bloque modular antirreflejante de dos cámaras con panel frontal e intermedio permeable ranurado desmontable y panel posterior impermeable desmontable.

Realización preferente de la invención

A la vista de las figuras reseñadas puede observarse como dentro del concepto general de la invención se ha previsto disponer, en las filas superiores de los

muelles, bloques antirreflejantes constituidos por elementos modulares antirreflejantes (2) sustituyendo a los bloques macizos (1) de los muelles de bloques en la zona donde el plano definido por la superficie libre del agua en reposo intersecta a la estructura. Esta disposición de elementos modulares antirreflejantes (2) en el borde de áreas de flotación genera varias cámaras separadas por paneles permeables fijos o desmontables, con orificios (8) o ranuras (6), que son apropiadas para reducir la reflexión del oleaje en un amplio rango de frecuencias. El oleaje incidente se refleja parcialmente primero en el panel frontal (3) que forma el paramento frontal del muelle, en el panel o paneles permeables intermedios después y finalmente en el panel trasero (4) impermeable lo que permite atenuar la reflexión en un mayor rango de frecuencias. El carácter modular del bloque antirreflejante permite adaptar fácilmente la permeabilidad de paneles y longitud de cámaras para adecuarlas a las características de las ondas que deben ser neutralizadas.

Tal como anteriormente se ha dicho, la realización preferente de la invención consiste en mantener la mayor parte de la estructura de muelle de bloques, modificando sólo la parte superior del muelle, hasta una cierta profundidad (7), para formar un sistema de cámaras múltiples adecuadas para atenuar la reflexión en un amplio rango de frecuencias. El número de elementos modulares antirreflejantes (2) que se unen para formar el bloque multicámara antirreflejante y la permeabilidad de los paneles frontales (3) e intermedios serán los adecuados para atenuar la reflexión del oleaje con la efectividad y el rango de frecuencias requerido en cada caso. Los espesores y el armado de los paneles y elementos modulares antirreflejantes serán los adecuados para resistir las acciones del oleaje y del terreno, así como las inducidas por la manipulación, montaje y puesta en obra de los elementos modulares antirreflejantes (2) y los bloques que forman.

Tanto los paneles frontales (3) como los paneles traseros (4) pueden ser fijos o desmontables y pueden ser de diferentes materiales y formas, especialmente los paneles desmontables que pueden ser muy ligeros e incluso flexibles.

Además, el elemento modular puede presentar aberturas tanto en las caras laterales como en la superior e inferior, para conectar hidráulicamente con elementos modulares contiguos favoreciendo, igualmente, una mayor disipación de la energía del oleaje, siendo susceptible de presentar otro panel en su cara posterior, tanto permeable como impermeable, según sea necesario.

Las figuras 1 a 3 muestran una vista en perspectiva, la sección transversal y vista frontal de una aplicación típica de la invención en un muelle de bloques, en el que las dos filas superiores de bloques macizos (1) se han sustituido por bloques antirreflejantes modulares constituidos por dos elementos modulares antirreflejantes (2).

Las figuras 4 y 6 describen diferentes realizaciones de la presente invención, con elementos modulares antirreflejantes (2) con paneles frontales (3) ranurados fijos y desmontables, paneles traseros (4) impermeables fijos y desmontables. La figura 5 muestra un elemento modular (2) con cara trasera libre adecuada para aumentar la longitud de las cámaras antirreflejantes o para formar bloques de mayor longitud uniendo elementos modulares antirreflejantes (2).

Las figuras 7 a 9 describen, a su vez, diferentes realizaciones de bloques modulares antirreflejantes constituidos por dos elementos modulares antirreflejantes (2) para formar bloques antirreflejantes de

doble cámara. El bloque de doble cámara resultante es de paneles ranurados en la figura 7, de paneles perforados en la figura 8 y de paneles ranurados desmontables en la figura 9.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Elemento modular antirreflejante (2) para formar bloques para la atenuación del oleaje reflejado, **caracterizado** porque tiene una estructura paralelepípedica con una cámara interior, un panel frontal (3) permeable que consiste en un panel desmontable con orificios (8) o ranuras (6); un panel trasero desmontable impermeable y unas caras laterales con unas aberturas (5).

2. Elemento modular antirreflejante según la reivindicación 1, **caracterizado** porque comprende aberturas en sus caras laterales y/o superior, y/o inferior.

3. Uso del elemento modular antirreflejante definido en una de las reivindicaciones 1 o 2, para la formación de bloques antirreflejantes de cámaras múltiples, en los que dichos elementos modulares están unidos unos a otros por yuxtaposición o por machihembrado.

4. Uso del elemento modular antirreflejante definido en una de las reivindicaciones 1 o 2, para la formación de bloques antirreflejantes de cámaras múltiples, en los que dichos elementos modulares están unidos unos a otros en la dirección perpendicular a la cara frontal del elemento modular que cuenta con el panel frontal permeable (3) y el panel trasero impermeable (4).

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

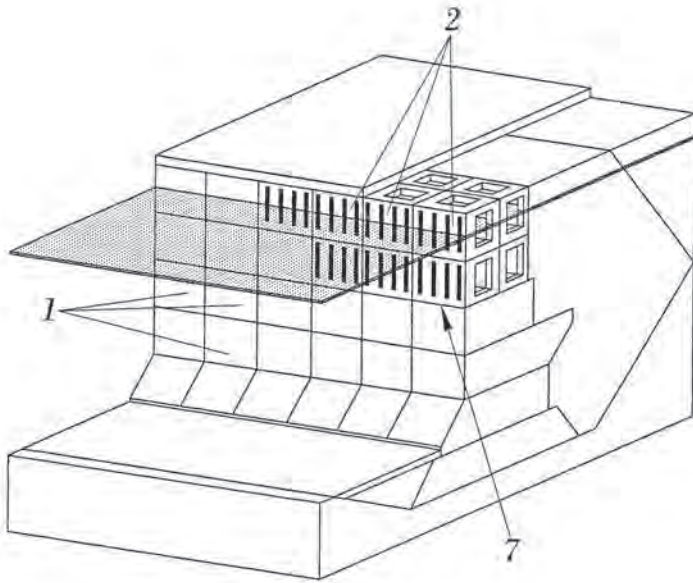


FIG. 1

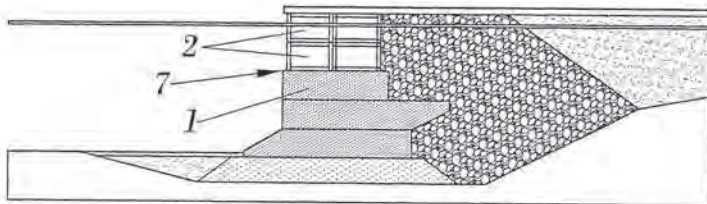


FIG. 2

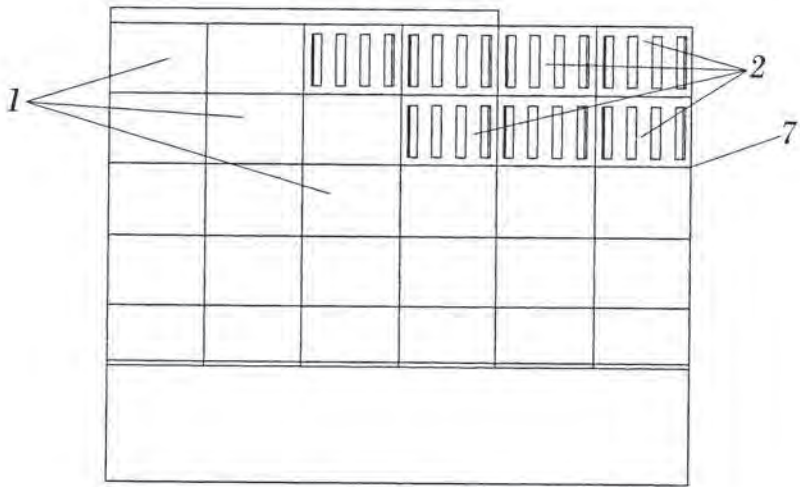


FIG. 3

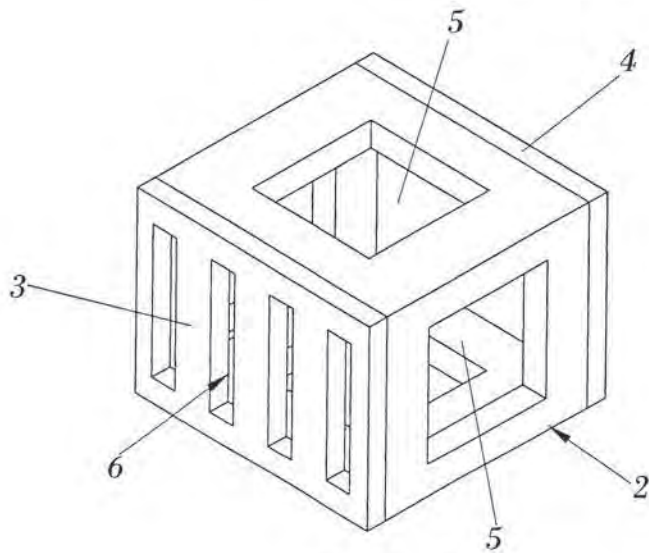


FIG. 4

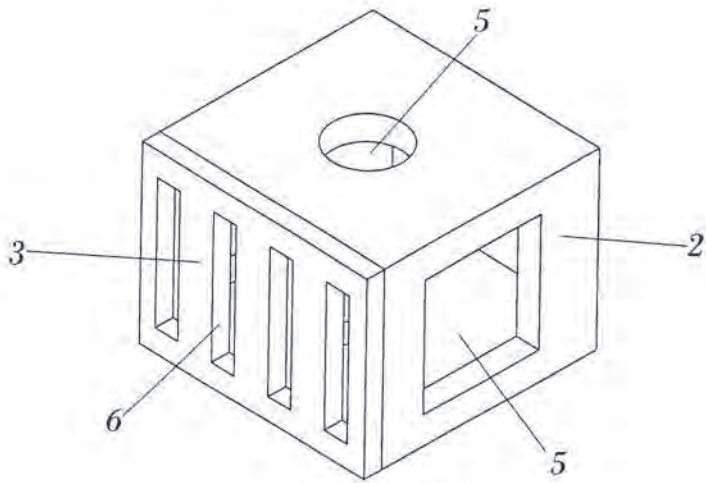


FIG. 5

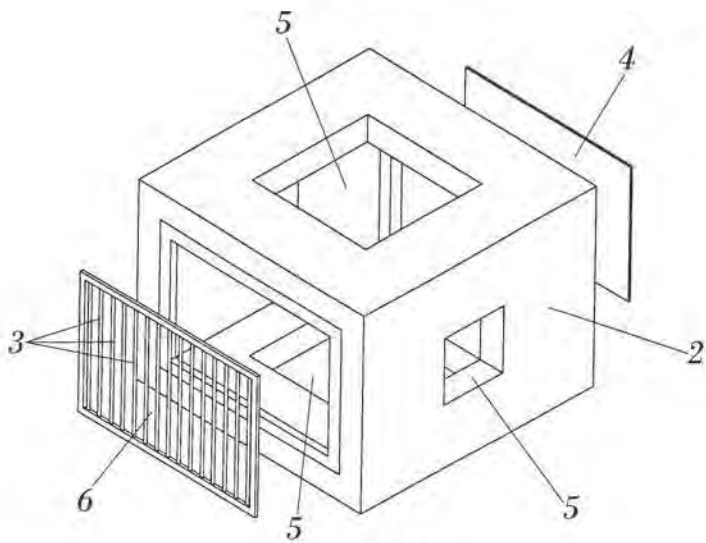


FIG. 6

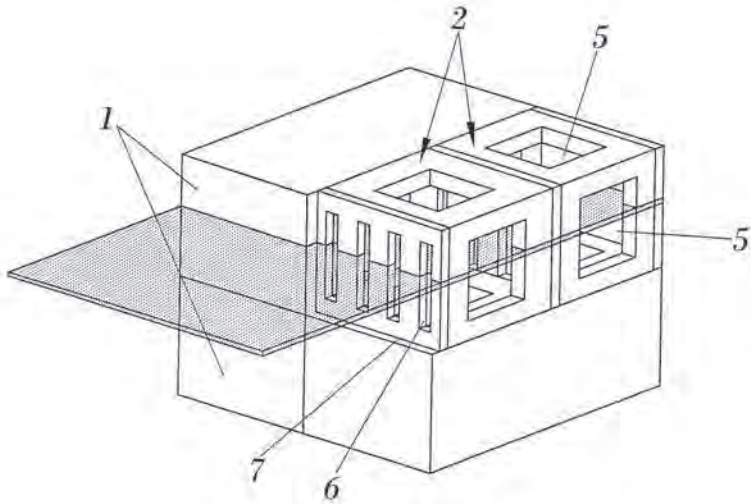


FIG. 7

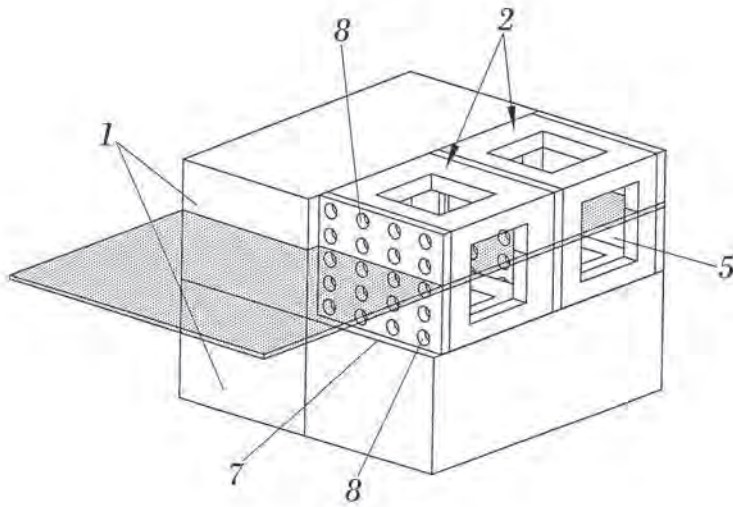


FIG. 8

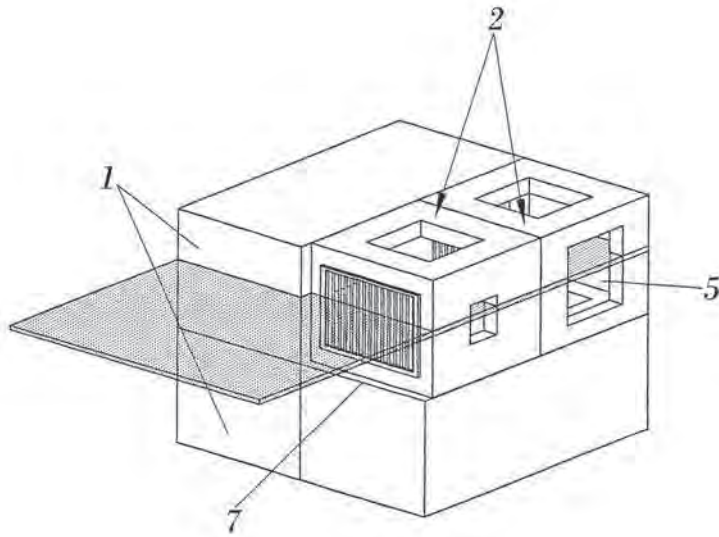


FIG. 9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 299 394

② N° de solicitud: 200602955

② Fecha de presentación de la solicitud: 13.11.2006

③ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: E02B 3/06 (2006.01)
E02B 3/14 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X Y	JP 10060857 A (NIPPON SOLID CO LTD) 03.03.1998, resumen; figuras.	1,2,5,6,9 4,7
X	US 3280569 A (WOSENITZ et al.) 25.10.1966, todo el documento.	1,3,5,9
X Y	ES 2214475 T3 (DORRELL DONALD EDWARD) 16.09.2004, todo el documento.	1,5,9,10 4,7
X	JP 8003965 A (SUMINO SHIYOUHACHI; TOYO SUIKEN KK) 09.01.1996, resumen; figuras.	1,5,8,9, 10
X	JP 2091313 A (SUGIURA KUNIO) 30.03.1990, resumen; figuras	1,2,5,8,9, 10
X	JP 2001003367 A (SENDA SHOHEI) 09.01.2001, resumen; figuras	1,5,8,9, 10
X	ES 1010069 U (NOBUHIKO IWASA) 01.12.1989, todo el documento.	1,5,8,9

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n°:

Fecha de realización del informe
14.02.2008

Examinador
F. Calderón Rodríguez

Página
1/1

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 301 402**

21 Número de solicitud: 200603099

51 Int. Cl.:

E02B 3/06 (2006.01)

E02D 23/00 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCÓN CON EXAMEN PREVIO

B2

22 Fecha de presentación: **23.11.2006**

43 Fecha de publicación de la solicitud: **16.06.2008**

Fecha de la concesión: **06.08.2009**

Fecha de modificación de las reivindicaciones:
16.06.2009

45 Fecha de anuncio de la concesión: **27.08.2009**

45 Fecha de publicación del folleto de la patente:
27.08.2009

73 Titular/es: **Universidad Politécnica de Valencia
CTT-Edificio 6G - Camino de Vera, s/n
46022 Valencia, ES**

72 Inventor/es: **Garrido Checa, Joaquín de María;
González Escriba, José Alberto y
Medina Folgado, Josep Ramón**

74 Agente: **No consta**

54 Título: **Dique antirreflejante.**

57 Resumen:

Dique antirreflejante aplicable a diques verticales y a muelles portuarios y similares que tiene por objeto reducir la reflectividad o el oleaje reflejado en un amplio rango de frecuencias que se estructura básicamente a partir de un cajón (5) prefabricado formado por celdas (11, 12, 13, 14 y 15) en donde al menos una fila de ellas (11) se transforma en cámaras prismáticas (1) que cuentan con aberturas, perforaciones o ranuras (2, 8, 17, 18, 19) y en donde al menos una de las filas de celdas (12) situada por detrás de la anterior se elimina para crear una cámara abierta (3) que se forma entre las anteriores y pared reflejante trasera (4), de forma que la dinámica de llenado/vaciado de las cámaras prismáticas (1) sea diferente de la dinámica de llenado/vaciado de dicha cámara abierta (3).

ES 2 301 402 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP.

DESCRIPCIÓN

Dique antirreflejante.

5 **Objeto de la invención**

La presente solicitud de Patente de Invención consiste, conforme indica su enunciado, en un dique antirreflejante, que dentro del campo de las obras hidráulicas marítimas y portuarias se encuentra dentro de aquellos denominados diques verticales de cajones, utilizados para generar áreas abrigadas.

10 Más concretamente, la invención tiene por objeto principal un dique antirreflejante aplicable no solo a diques verticales sino también a muelles portuarios y espaldones de diques en talud que reduce la reflectividad o el oleaje reflejado en un amplio rango de frecuencias y los rebases sobre el dique mediante el establecimiento de cámaras prismáticas frontales con aberturas que definen recintos de diferentes tamaños, formas y dinámicas.

15 **Antecedentes de la invención**

De todos es conocida la importancia que a lo largo de la historia ha tenido el contar con unas instalaciones portuarias o litorales que faciliten el tránsito marítimo de una manera segura, sencilla y fiable, permitiendo así también el tránsito de personas y mercancías en condiciones óptimas.

25 A tal fin, ya muchos años atrás se desarrollaron obras de abrigo poco reflejantes como los diques en talud o diques rompeolas, que proporcionan protección frente al oleaje, provocando la rotura del oleaje sobre el talud y reflejando solamente una parte de la energía del mismo. Sin embargo, tanto las dificultades de aprovisionamiento de los materiales necesarios para su construcción, como el impacto ambiental causado durante la misma, han favorecido otras tipologías más adecuadas.

30 Concretamente, los diques verticales, que permiten proporcionar espacios portuarios protegidos frente a la acción del oleaje, con menor consumo de materiales de cantera y menores tráficos inducidos durante la construcción, pero que reflejan una buena parte de la energía del oleaje.

35 Estos diques con paramento sensiblemente vertical, se suelen construir a más de 10 metros de profundidad y pueden estar contruidos con cajones prefabricados, bloques, tablestacas, recintos hincados, etc. con una cimentación más o menos importante dependiendo de las características del fondo marino en el que se apoyan. En particular, los diques verticales de cajones permiten industrializar el proceso de fabricación de diques y muelles, pudiendo separar la ejecución de una buena parte de las obras del lugar del emplazamiento del dique o muelle con el consiguiente beneficio ambiental que ello supone.

40 Por otro lado, los diques verticales cuentan con el inconveniente de que al reflejar una buena parte de la energía del oleaje que alcanza la estructura, este oleaje reflejado aumenta la agitación en la zona marítima exterior próxima al dique, afectando negativamente a la navegación cerca del dique, a la dinámica litoral próxima e incluso a la propia agitación portuaria interior. Además, la fuerte reflexión de los diques verticales aumenta las fuerzas sobre el mismo, el rebase de la estructura por el oleaje y las corrientes en la zona, afectando con ello las condiciones de estabilidad del cuerpo del dique, a su estructura y cimentación.

45 Para solventar estos inconvenientes, tanto desde el punto de vista económico como ambiental, era necesario por consiguiente una modificación estructural de dichos diques verticales que permitiera reducir la reflectividad de la estructura, propiciando así una reducción de las fuerzas de pico sobre la estructura, del rebase del dique, de las corrientes en el entorno y del oleaje total de la zona próxima.

50 Así surgieron una serie de soluciones, tales como los diques denominados "Jarlan", recogidos en la patente US3118282 y consistentes en establecer una cámara perforada frente al dique para disipar la energía del oleaje y desfasar el oleaje reflejado en la pared frontal permeable y la trasera impermeable. Este diseño clásico antirreflejante Jarlan sufrió posteriormente variaciones tales como añadir varias cámaras perforadas, modificar la morfología de las perforaciones, y otras, de cara todas ellas a mejorar las condiciones de reflectividad de la estructura en un mayor rango de frecuencias.

60 Además del sistema Jarlan ya comentado, se han propuesto otras formas de reducir la reflectividad de los diques verticales en general y los diques y muelles de cajones en particular, como por ejemplo, la instalación de una fila de pilotes con una cierta permeabilidad para reducir la reflectividad de la estructura, utilizar pantallas múltiples ranuradas para controlar la reflexión del oleaje, utilizar filas de columnas cilíndricas verticales o pantallas múltiples crecientes frente a los diques y muelles, construir pilas cilíndricas con la cabeza en talud para provocar la rotura del oleaje y reducir la reflexión, e incluso recurrir a estructuras de acero u hormigón circular con múltiples cámaras ideadas para flotar en estructuras exteriores.

65 Sin embargo, estas soluciones, si bien son aceptables para disminuir la reflectividad para una determinada banda estrecha de frecuencias de oleaje, presentan el problema de no responder bien para el resto de frecuencias, convir-

tiéndose por lo tanto en sistemas poco versátiles o, dicho de otro modo, no ofreciendo una buena respuesta para comportamientos del oleaje diferentes a aquellos para los que fue diseñada su respuesta.

Descripción de la invención

5 La invención que a continuación se describe resuelve los inconvenientes antes señalados, pues consigue reducir la reflectividad para un mayor rango de frecuencias, a la vez que constituye una solución económicamente viable, ya que puede ser aplicada con una ligera modificación de los métodos constructivos utilizados para los diques y muelles de cajones convencionales.

10 Además, dada su particular estructura el dique antirreflejante de la invención es aplicable no solo a diques verticales y en especial a diques de cajones prefabricados, sino también a muelles, espaldones y, en general, estructuras de paramento sensiblemente vertical para las que se desee reducir su reflectividad frente al oleaje y oscilaciones del mar de no muy largo periodo tales como oleaje, ondas de acompañamiento, etc.

15 Más concretamente, el dique antirreflejante de la presente invención es del tipo de los definidos a partir de grandes cajones prefabricados para instalar a más de 10 metros de calado, en el que la parte superior de las filas frontales de dichos cajones ha sido modificada hasta una cierta profundidad.

20 Esta modificación consiste en sustituir dichas filas frontales de los cajones por cámaras prismáticas huecas perforadas, ranuradas o con aberturas, alineadas delante del resto de los cajones que no han sido modificados y que constituyen el nuevo paramento vertical trasero.

De esta forma, se crean dos tipos de cámaras con dos dinámicas de llenado y/o vaciado diferentes:

- 25 - Las cámaras prismáticas perforadas o ranuradas; y
- Las cámaras que quedan entre el paramento vertical trasero y las cámaras prismáticas.

30 De esta forma, al tener al menos dos tipos de cámaras con dos dinámicas diferentes de llenado y/o vaciado, se consigue una mayor efectividad de cara a la reflexión, es decir, reducir o atenuar las reflexiones, en un rango de frecuencias mucho mayor.

35 Esta reducción o atenuación de la reflexión, podrá además graduarse en función de la variación de un buen número de parámetros asociados a la existencia, estructura y posición de las mencionadas cámaras.

Más concretamente, la efectividad atenuadora de las cámaras prismáticas dependerá de parámetros tales como su forma, tamaño, altura, distancia y posición relativa o respecto al paramento vertical trasero, su porosidad y su tipo de abertura, ranurado o perforado.

40 Además, dentro de los anteriores parámetros son de especial relevancia la forma o sección de las cámaras prismáticas, así como la forma y disposición de las aberturas, ranuras o perforaciones que presenten, dado que todo ello modificará el comportamiento del agua dentro de las mismas, favoreciendo en mayor o menor medida la rotación del agua y por lo tanto retrasando también en mayor o menor medida la fase de vaciado de la cámara.

45 Asimismo, de cara a conseguir que el agua disipe mayor energía o favorecer la rotación de la misma dentro de la cámara, éstas podrán contar en su interior con elementos de fricción simétricos o asimétricos.

50 Con todo ello, y tal y como ya se ha dicho, gracias a la existencia de al menos dos tipos de cámaras con dinámicas de llenado y/o vaciado diferente se consigue, para una amplio rango de frecuencias, una reducción de la reflectividad del cajón o dique vertical en su conjunto mejorando las condiciones de navegación en el entorno y el impacto ambiental sobre las zonas próximas, una reducción del oleaje total y de las fuerzas sobre la estructura y las corrientes inducidas en el entorno de la estructura y por último también una reducción del rebase.

55 Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

60 La figura 1.- Muestra una vista en perspectiva del dique de la presente invención en el que puede apreciarse una fila de de cámaras prismáticas atenuadoras de sección circular.

65 La figura 2.- Muestra una vista en sección del alzado lateral del dique representado en la figura 1.

La figura 3.- Muestra un detalle de la vista frontal del dique de la figura 1.

La figura 4.- Muestra dos secciones en planta del dique de la figura 1 en donde pueden apreciarse las corrientes asociadas a la llegada de la cresta y el seno de la ola.

5 La figura 5.- Muestra una sección transversal de la cámara prismática de sección circular de la figura 1 así como el sentido inducido de rotación del agua.

La figura 6.- Muestra una vista en sección del alzado lateral de un dique con dos filas de cámaras prismáticas atenuadoras de sección circular.

10 La figura 7.- Muestra la vista frontal del dique de la figura 6.

La figura 8.- Muestra la sección en planta del dique de la figura 6 y las corrientes inducidas dentro de las cámaras atenuadoras prismáticas de sección circular.

15 La figura 9.- Muestra una sección en planta de un dique con una fila de cámaras cilíndricas y separadores.

La figura 10.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular de cuatro ranuras descentradas y el sentido de rotación del agua inducido.

20 La figura 11.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular de tres aberturas descentradas y el sentido de rotación del agua inducido.

La figura 12.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular de dos ranuras con elementos de fricción internos asimétricos y sentido de rotación del agua inducido.

25 La figura 13.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular de cuatro ranuras axiales.

30 La figura 14.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular perforada mediante tubos axiales embebidos.

La figura 15.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección cuadrada perforada mediante tubos embebidos.

35 La figura 16.- Muestra una vista en alzado de una cámara prismática con ranuras continuas a lo largo de toda su altura.

La figura 17.- Muestra una vista en alzado de una cámara prismática con ranuras discontinuas a lo largo de toda su altura.

40 La figura 18.- Muestra una vista en alzado de una cámara prismática con hileras de orificios.

Realización preferente de la invención

45 A la vista de las figuras 1 a 4 puede observarse como el dique antirreflejante de la presente invención se estructura a partir de un cajón (5) prefabricado formado por celdas (11, 12, 13, 14 y 15) en el que la parte superior de la fila de celdas frontal (11) se ha transformado, hasta una cierta profundidad (6), en cámaras prismáticas (1) separadas una distancia (16), y la parte superior de la segunda fila de celdas (12) ha sido eliminada para formar la cámara abierta (3) que queda entre el paramento vertical trasero y las citadas cámaras prismáticas (1), paramento vertical trasero que está formado a su vez por la pared frontal de la tercera fila de celdas (13) del cajón, y que constituye ahora la pared reflejante trasera (4).

55 En otra posible realización de la invención, que puede verse en las figuras 6 a 8, se transforman en cámaras prismáticas (1) las dos primeras filas de celdas (11, 12), estando formada la cámara abierta (3) por la eliminación de la parte superior de la tercera fila de celdas (13), permaneciendo sin modificar las filas de celdas (14) y (15). En ese caso, por lo tanto, la pared frontal de la cuarta fila de celdas (14) del cajón constituye ahora la pared reflejante trasera (4).

60 De la misma forma, y como es obvio, en función del número de filas de las que disponga el dique y del número de éstas que sean transformadas o substituidas por cámaras prismáticas (1), se obtendrán diques antirreflejantes de diferentes comportamientos.

65 Del mismo modo, cualquiera de las configuraciones anteriormente dichas podría modificarse de forma que la cámara abierta (3) quede compartimentada por medio de separadores (7), tal y como puede apreciarse en la figura 9, bien por necesidades de diseño de cara al comportamiento ante una determinada frecuencia de oleaje o bien para dotar a la misma de mayor rigidez estructural. Estos separadores (7) que pueden además permitir el flujo lateral a su través por medio de aberturas disipadoras de energía o similares.

ES 2 301 402 B2

En cuanto a la forma de las cámaras prismáticas (1), la separación entre ellas (16), y la forma de sus aberturas, ranuras o perforaciones, éstas dependerán de la respuesta a la reflexión que se desee para un dique determinado.

5 Una posible realización es el caso de cámaras prismáticas (1) de forma cilíndrica y aberturas descentradas (8), como puede observarse en las figuras 1 a 9, y más especialmente en la 5. En esta figura, se muestra una cámara prismática (1) de sección circular con dos aberturas descentradas (8) tipo ranura, de forma que el sentido de rotación del agua (9) se vea favorecido por dichas aberturas descentradas (8), creando un sentido preferente de rotación tanto en situación de llenado como de vaciado.

10 Otra posible forma de realización de las aberturas de las cámaras prismáticas (1) de sección circular es la de que éstas sean axiales (2), tal y como puede verse en las figuras 13 a 15.

15 Evidentemente, tanto las aberturas axiales (2) como las descentradas (8) pueden adoptar múltiples configuraciones (número, forma, tamaño, penetración, etc.).

A modo de comparación, en el caso de las aberturas descentradas (8) se favorece la rotación del agua (9) dentro de las cámaras prismáticas (1) de sección circular, cambiando la dinámica de llenado/vaciado al retrasar el vaciado respecto a las aberturas axiales (2).

20 En cualquier caso, ya sean las aberturas axiales (2) o descentradas (8), lo que se persigue es que proporcionen una dinámica de llenado/vaciado de las cámaras prismáticas (1) diferente de la dinámica de llenado/vaciado de la cámara abierta (3) que se forman entre las anteriores y pared reflejante trasera (4).

25 De esta forma, y tal y como ya se dijo anteriormente, las dimensiones de las cámaras prismáticas (1) y su sección, de las aberturas (2, 8) y de las separaciones entre dichas cámaras (1) serán los parámetros de diseño a tener en cuenta de cara a atenuar la reflexión del oleaje con la efectividad y rango de frecuencias requerido.

30 Tal y como puede verse en la figura 12, la rotación del agua (9) dentro de las cámaras prismáticas (1) de sección circular se puede favorecer con elementos de fricción asimétricos (10) situados en el fondo o las paredes de las cámaras cilíndricas. Estos elementos de fricción (10) también pueden utilizarse en las cámaras abiertas (3) para disipar energía, o en el exterior de las propias cámaras prismáticas (1).

35 Dicho lo anterior, y según otros posibles modos de realización, en las figuras 10 a 12 se muestran diferentes secciones de cámaras prismáticas (1) de sección circular con aberturas descentradas (8) para favorecer la rotación del agua (9) dentro de la cámara cilíndrica (1).

40 En las figuras 13 y 14, que recogen otras posibles realizaciones, se muestran diferentes secciones de cámaras prismáticas (1) de sección circular con aberturas axiales (2), estando dicha cámara en el caso de la figura 14 perforada mediante tubos axiales embebidos.

45 Según otra posible realización, mostrada en la figura 15, la sección de la cámara prismática (1) puede ser cuadrada con aberturas axiales (2), o más concretamente, con tubos axiales embebidos.

Otras posibles realizaciones de aberturas en las cámaras prismáticas (1) serían las de las figuras 16 a 18, en donde se muestran diferentes tipos, bien continuas (17) o discontinuas (18) a lo largo o no de toda su altura, o bien a modo de hileras de orificios (19) también repartidos o no por toda su altura.

50 Por último, los espesores y armado de las cámaras prismáticas (1) y de los separadores (7), en su caso, serán los adecuados para resistir las acciones inducidas por el oleaje.

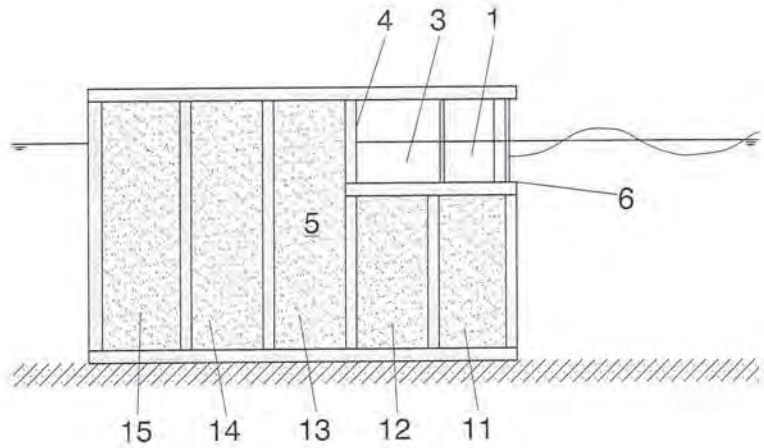
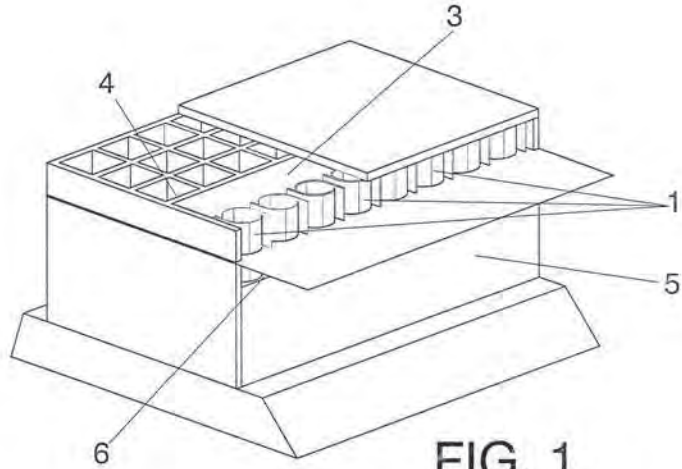
55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Dique antirreflejante estructurado a partir de un cajón (5) prefabricado formado por celdas (11, 12, 13, 14 y 15) **caracterizado** porque:
- una pluralidad de celdas de al menos una fila frontal (11) y las celdas posteriores (12, 13, 14, 15) de al menos la siguiente fila (12) se suprimen, formando un espacio hueco en el interior del cajón que queda abierto por su cara frontal y delimitado al menos por paredes inferior, laterales y posterior;
- comprende una pluralidad de cámaras prismáticas (1) situadas en el interior del espacio hueco sobre la pared inferior, próximas a la abertura frontal del espacio hueco, en fila y separadas entre sí una distancia (16); las cámaras prismáticas contando con aberturas, perforaciones o ranuras (2, 8, 17, 18, 19); y
- entre la pared posterior y las cámaras prismáticas (1) hay una distancia de al menos la anchura de una fila de celdas (12) suprimida, formando un espacio abierto que constituye una cámara complementaria (3) entre la pared posterior (4) y las citadas cámaras prismáticas (1).
2. Dique antirreflejante según reivindicación 1ª, **caracterizado** porque se transforman en cámaras prismáticas (1) las dos primeras filas de celdas (11, 12), y porque la cámara complementaria (3) se forma por la eliminación de la tercera fila de celdas (13).
3. Dique antirreflejante según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque para formar las cámaras prismáticas (1) y/o la cámara complementaria (3) solo se transforma la parte superior de las filas de celdas hasta una cierta profundidad (6).
4. Dique antirreflejante según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque la cámara complementaria (3) se compartimenta por medio de separadores (7) los cuales pueden contar, opcionalmente, con aberturas para permitir el flujo lateral a su través.
5. Dique antirreflejante según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) son de sección circular.
6. Dique antirreflejante según reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) son de sección cuadrada.
7. Dique antirreflejante según reivindicaciones 5 o 6, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) cuentan con aberturas descentradas (8).
8. Dique antirreflejante según reivindicación 7, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) cuentan con aberturas descentradas (8) tipo ranura.
9. Dique antirreflejante según reivindicaciones 5 o 6, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) cuentan con aberturas axiales (2).
10. Dique antirreflejante según reivindicación 9, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) cuentan con aberturas axiales (2) en forma de tubos embebidos.
11. Dique antirreflejante según reivindicaciones 5 o 6, **caracterizado** porque las cámaras prismáticas (1) cuentan con aberturas continuas (17) y/o discontinuas (18) y/o hileras de orificios (19).
12. Dique antirreflejante según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque en el interior y/o exterior de las cámaras prismáticas (1) y/o en la cámara restante (3) cuenta con elementos de fricción asimétricos (10).



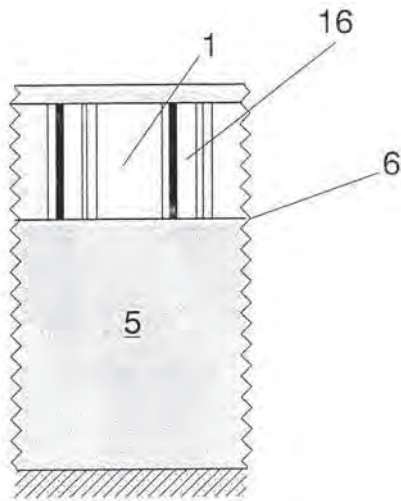


FIG. 3

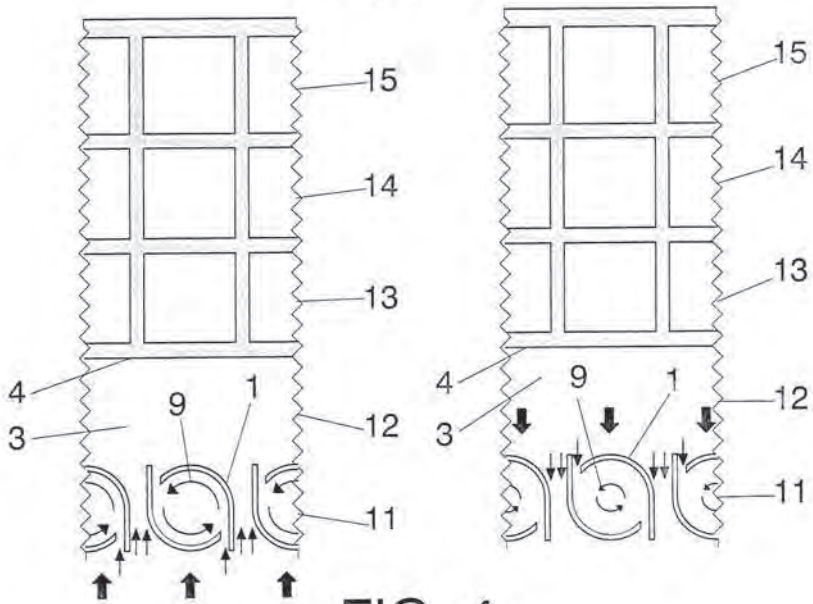


FIG. 4

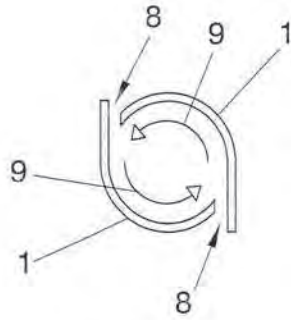


FIG. 5

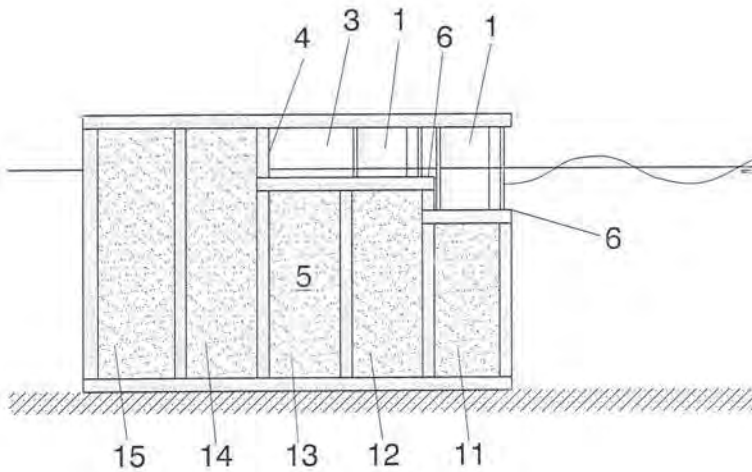


FIG. 6

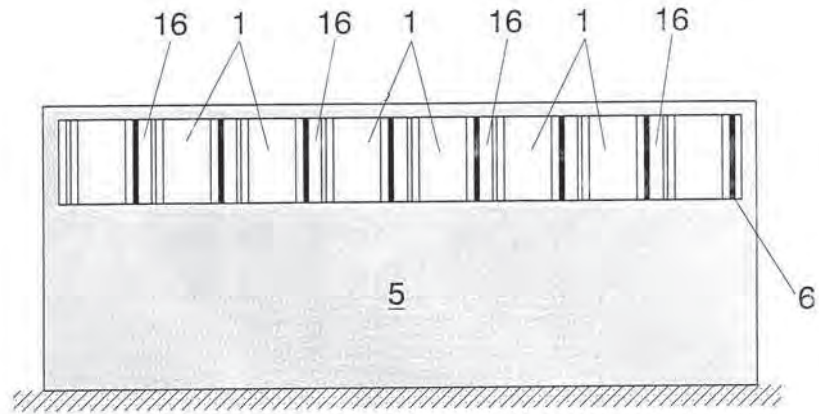


FIG. 7

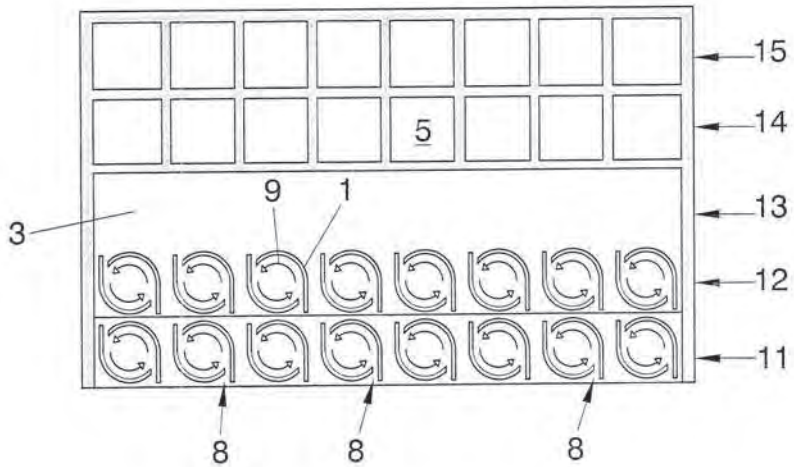


FIG. 8

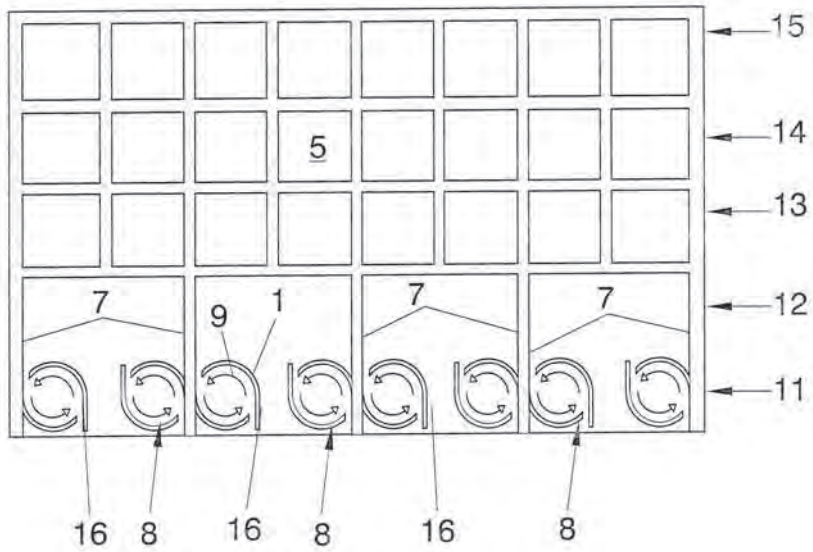


FIG. 9

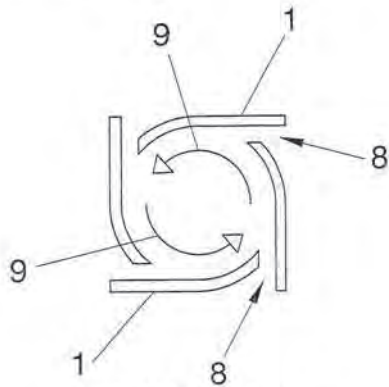


FIG. 10

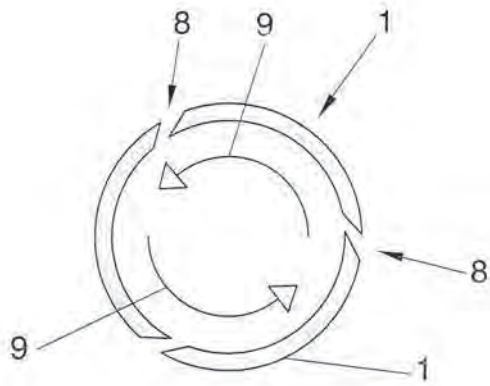


FIG. 11

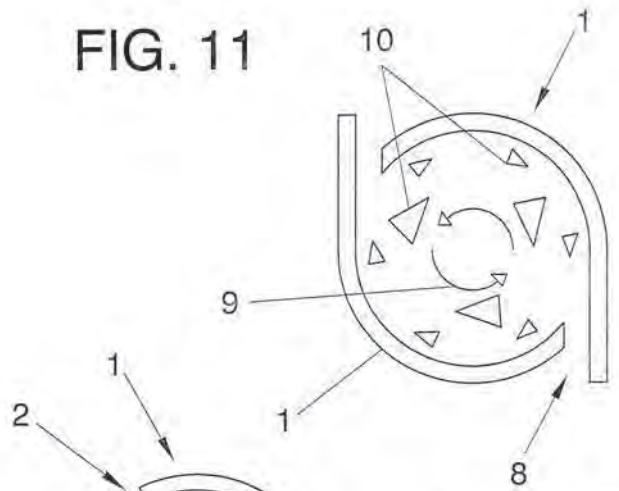


FIG. 12

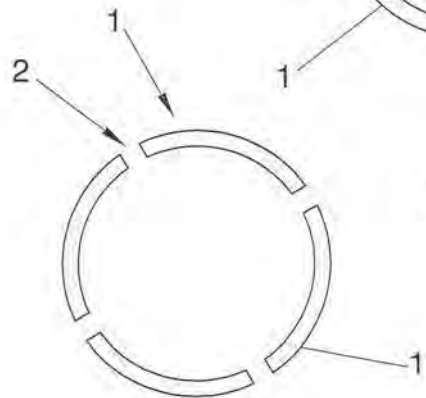


FIG. 13

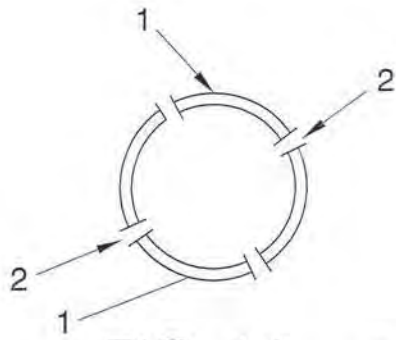


FIG. 14

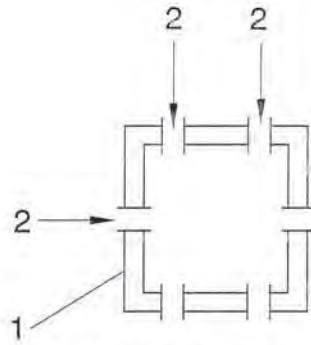


FIG. 15

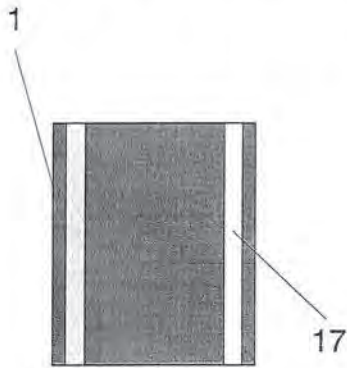


FIG. 16

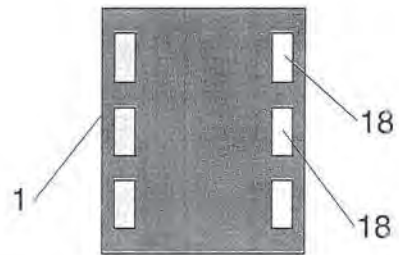


FIG. 17

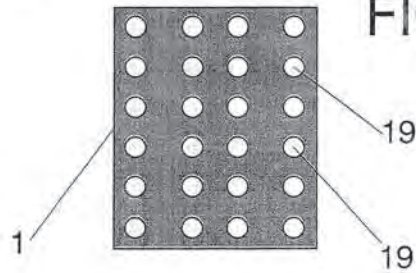


FIG. 18



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 301 402

②1 Nº de solicitud: 200603099

②2 Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2006

③2 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤1 Int. Cl.: E02B 3/06 (2006.01)
E02D 23/00 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤6 Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X Y	KR 20040105634 A (LEEDO CO LTD) 16.12.2004, resumen; figuras.	1,3,4 2,5-12
Y	KR 20040094025 A (KIM YOUNG CHUL) 09.11.2004, resumen; figuras.	2,7,8
Y	JP 63312409 A (HAZAMA GUMI) 20.12.1988, resumen; figuras.	5
Y	JP 54044332 A (YANAGI HIROFUMI) 07.04.1979, figuras.	6
Y	JP 6002316 A (DAIHO CONSTRUCTION CO LTD) 11.01.1994, resumen; figuras.	9,11
Y	JP 6185029 A (UNYUSHO DAIYON KOWAN KENSETSU; KUBOTA KK) 05.07.1994, resumen; figuras.	10
Y	KR 100650480 B1 (YOOIL ENGINEERING CONSULTANTS) 21.11.2006, figuras.	12

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
14.05.2008

Examinador
F. Calderón Rodríguez

Página
1/1

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 301 403**

21 Número de solicitud: 200603100

51 Int. Cl.:
E02B 3/06 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCÓN CON EXAMEN PREVIO

B2

- 22 Fecha de presentación: **23.11.2006**
- 43 Fecha de publicación de la solicitud: **16.06.2008**
- Fecha de la concesión: **02.12.2009**
- Fecha de modificación de las reivindicaciones:
13.10.2009
- 45 Fecha de anuncio de la concesión: **17.12.2009**
- 45 Fecha de publicación del folleto de la patente:
17.12.2009

- 73 Titular/es: **Universidad Politécnica de Valencia
CTT-Edif. G6 - Camino de Vera, s/n
46022 Valencia, ES**
- 72 Inventor/es: **Garrido Checa, Joaquín de María;
González Escriba, José Alberto y
Medina Folgado, Josep Ramón**
- 74 Agente: **No consta**

54 Título: **Bloque para muelle antirreflejante.**

57 Resumen:

Bloque para muelle antirreflejante.
Bloque utilizado para la construcción de muelles portuarios antirreflejantes y paramentos verticales de baja reflectividad frente al oleaje cuyo objetivo fundamental es la reducción de la reflectividad del oleaje en un amplio rango de frecuencias de cara a facilitar el atraque de embarcaciones y que básicamente se estructura a partir de una cámara prismática (3) con aberturas (9) y una pared posterior (6) que conforma el paramento vertical trasero, entre las cuales se define un espacio abierto que forma una cámara complementaria (4), contando cada una de dichas cámaras con dinámicas diferentes de llenado y/o vaciado.

ES 2 301 403 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 40.2.8 LP.

DESCRIPCIÓN

Bloque para muelle antirreflejante.

Objeto de la invención

La presente solicitud de Patente de Invención tiene como objetivo principal la reducción de la reflectividad de los muelles para el atraque de embarcaciones, aunque puede utilizarse también en diques de abrigo, defensas costeras y paseos marítimos, canales de navegación, contornos de dársenas y riberas del mar, lagos o ríos y otras aplicaciones en las que sea conveniente la reducción de la reflectividad de las estructuras y se coloquen los bloques objeto de la invención para generar cámaras prismáticas adecuadas para atenuar el oleaje reflejado en un amplio rango de frecuencias.

Antecedentes de la invención

Los muelles son estructuras para el atraque y amarre de embarcaciones, que generalmente ofrecen un paramento vertical muy reflejante al oleaje y oscilaciones del agua en la dársena o área de flotación en la que se encuentran. Para reducir la amplificación de la energía dentro de las zonas portuarias, áreas de navegación o espacios litorales es necesario reducir la reflectividad del contorno de las áreas de flotación o riberas utilizando tipologías poco reflejantes como taludes de escollera, playas, muelles claraboya o muelles antirreflejantes.

El uso de tipologías antirreflejantes de muelles, especialmente las de elementos prefabricados para muelles de bloques, está siendo favorecida por la necesidad de reducir la agitación portuaria sin alterar mucho la morfología del muelle y sin la introducción de elementos granulares (arenas, gravas, bolos o escollera) dentro de los puertos. En los grandes puertos comerciales, la motivación es similar a la de los pequeños puertos pero los calados y el tamaño de los buques favorece la solución de cajones prefabricados, a los que también se puede aplicar una solución de cámaras prismáticas semejante a la aplicada a los muelles de bloques para embarcaciones de menor calado.

La reducción de la reflectividad, en su aplicación para canales de navegación, defensas costeras longitudinales y paseos marítimos, se traduce en una menor inestabilidad del borde litoral que puede erosionarse por la reflexión, así como menores rebases y fuerzas sobre las estructuras.

Para reducir la reflectividad de los muelles verticales de bloques se han propuesto a lo largo de los años una serie de modificaciones estructurales con diferentes características basadas en el diseño de bloques especiales con formas complejas que apilados o ensamblados frente al muelle forman un paramento antirreflejante que se caracteriza por tener un espacio hueco entre el paramento frontal y el trasero del tipo "dique Jarlan" (US3118282, 1964) consistente en establecer una cámara perforada frente al dique para disipar la energía del oleaje y desfasar el oleaje reflejado en la pared frontal permeable y en la pared trasera impermeable.

Con el nuevo bloque que se propone se pueden formar muelles y paramentos antirreflejantes con dos tipos de cámaras con dinámicas de llenado/vaciado diferentes que resultan más efectivas para reducir la reflectividad de la estructura en un mayor rango de frecuencias.

Descripción de la invención

La invención que a continuación se describe re-

suelve los inconvenientes antes señalados, pues se trata de un tipo de bloque para construir muelles verticales antirreflejantes y, en general, paramentos verticales de baja reflectividad frente al oleaje, a las ondas de acompañamiento y las oscilaciones del mar o fluviales, para un amplio rango de frecuencias.

La reducción de reflexión, con las cámaras prismáticas que forman los bloques objeto de la invención, se consigue al sustituir el paramento vertical frontal impermeable por recintos prismáticos huecos permeables alineados delante del paramento vertical trasero del muelle o estructura vertical, manteniendo la mayor parte del proceso constructivo habitual del muelle de bloques y con la simple sustitución de bloques convencionales por los bloques antirreflejantes.

De esta forma, se crean dos tipos de cámaras con dos dinámicas de llenado/vaciado diferentes: delante, cámaras prismáticas con aberturas perforadas o ranuradas y, detrás, cámaras complementarias formadas por el espacio que queda entre el paramento vertical trasero y las cámaras delanteras. Al tener dos tipos de cámaras con dos dinámicas diferentes, aumentan las posibilidades de diseño para disminuir las reflexiones con mayor efectividad y en un rango de frecuencias más amplio.

Además, para el caso en el que las cámaras prismáticas tengan sección circular, se pueden utilizar aberturas descentradas que favorezcan la rotación del agua dentro de la cámara prismática pudiendo desfasar más el vaciado de los dos tipos de cámaras.

La efectividad atenuadora de los bloques objeto de la invención dependerá de las dimensiones del bloque que condicionará la separación entre cámaras prismáticas, la sección y dimensiones de las mismas, su distancia al paramento vertical trasero, su porosidad, tipo de aberturas (ranurado, perforado, etc.) y, en el caso de cámaras prismáticas de sección circular, la dirección de dichas aberturas (axial o descentrada). La altura del bloque afectará también la reflectividad y estará relacionada, normalmente, con el tamaño de los bloques sustituidos que se colocarán apilados, yuxtapuestos o machihembrados para formar el paramento antirreflejante.

Los bloques pueden además contener elementos de fricción interna para disipar energía o favorecer, en su caso, la rotación del agua dentro de las cámaras prismáticas de sección circular que se formen.

Con todo ello, la ventaja fundamental de la invención radica en la flexibilidad de diseño ya que, además de conseguir la efectividad de la doble cámara sin ser construida, con ligeras variaciones en las aberturas de la cámara prismática se puede adaptar la respuesta de la estructura a unas determinadas condiciones climáticas y puede ser efectiva en un rango de frecuencias mucho mayor que el que se obtiene con bloques que forman una sola cámara.

Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, de un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1.- Muestra una vista en perspectiva de un muelle al que se le han acoplado los bloques antirreflejantes de la presente invención.

La figura 2.- Muestra una vista en sección del alzado lateral del muelle representado en la figura 1.

La figura 3.- Muestra un detalle de la vista frontal del muelle de la figura 1.

La figura 4.- Muestra una vista en perspectiva de un bloque con cámara prismática de sección circular y ranuras descentradas acoplado al muelle y una vista en planta seccionada de dicho bloque.

La figura 5.- Muestra una vista en planta seccionada de sendos bloques como el de la figura 4 acoplados en donde además se aprecian las corrientes asociadas a la cresta y al seno de la ola incidente sobre el muelle.

La figura 6.- Muestra una vista en perspectiva y otra en planta de un bloque como el de la figura 4 pero con ranuras axiales.

La figura 7.- Muestra una vista en perspectiva de un bloque con cámara prismática de sección rectangular y cuatro ranuras acoplado al muelle y una vista en planta seccionada de dicho bloque.

La figura 8.- Muestra una vista en perspectiva y otra en planta de un bloque como el de la figura 7 pero con cuatro ranuras.

La figura 9.- Muestra una vista en planta seccionada de tres bloques como el de la figura 8 acoplados en donde además se aprecian las corrientes asociadas a la cresta y al seno de la ola incidente sobre el muelle.

Realización preferente de la invención

A la vista de las figuras, puede observarse el bloque antirreflejante (1) de la invención, destinado a sustituir a los bloques macizos (2) que conforman los muelles de bloques tradicionales hasta una cierta profundidad (7), de forma que al menos se substituyan aquellos situados en las zonas donde el plano horizontal del nivel de agua en reposo corta la estructura. Este se configura a partir de una estructura en cuya parte frontal se dispone una cámara prismática (3), con aberturas (9), y una pared posterior (6) que conforma el paramento vertical trasero, existiendo entre ambas un espacio abierto que forma una cámara complementaria (4).

El oleaje incidente se refleja parcialmente en la pared frontal (5) de la cámara prismática (3) primero y en la pared trasera (6) después. En la cámara complementaria (4) se generan corrientes asociadas a las ondas reflejadas desfasadas que interfieren con el oleaje incidente atenuando la reflexión global de la estructura.

Por su parte, la cámara prismática (3) tiene una dinámica de llenado-vaciado completamente diferente a la de la cámara complementaria (4) ampliando el rango de frecuencias en que se disminuye la reflexión.

Por otro lado, bien por necesidades de diseño de cara a mejorar el comportamiento ante una determinada frecuencia de oleaje o bien para dotar a la misma de mayor rigidez estructural, las cámaras complementarias pueden estar divididas en compartimentos por uno o varios tabiques (10) los cuales a su vez pueden contar con orificios (8) que favorezcan la disipación adicional de energía.

La sección y dimensiones de las cámaras prismáticas (3), de las aberturas (9) y de las separaciones entre dichas cámaras prismáticas (3) serán las adecuadas para atenuar la reflexión del oleaje con la efectividad y el rango de frecuencias requerido. Los espesores y el armado del bloque antirreflejante (1) serán los necesarios para resistir las acciones del oleaje y terreno, así como las inducidas por el transporte, manipulación y puesta en obra de los bloques.

Una posible realización es el caso de cámaras prismáticas (3) de sección circular y aberturas (9) descentradas, tal y como puede observarse en las figuras 4 y 5, en donde se muestra una cámara prismática (3) de sección circular con dos aberturas (9) descentradas, de forma que el sentido de rotación del agua se vea favorecido por dichas aberturas (9) descentradas, creando un sentido preferente de rotación tanto en situación de llenado como de vaciado que aumenta el desfase entre los vaciados de la cámara prismática (3) y la cámara complementaria (4).

Otra posible forma de realización de las aberturas (9) de las cámaras prismáticas (3) de sección circular es la de que éstas sean axiales, tal y como puede verse en la figura 6.

Evidentemente, las aberturas (9) tanto axiales como descentradas pueden adoptar múltiples configuraciones (número, forma, tamaño, penetración, etc.) de cara a conseguir en el bloque de la invención una respuesta determinada para un rango de frecuencias también determinado.

Además, la rotación del agua dentro de las cámaras prismáticas (3) de sección circular se puede favorecer con elementos de fricción asimétricos, no representados, situados en el fondo o las paredes de las cámaras cilíndricas. Estos elementos de fricción también pueden utilizarse en las cámaras complementarias (4) para disipar energía, o en el exterior de las propias cámaras prismáticas (3).

En otra posible realización mostrada en las figuras 8 y 9, puede verse un bloque cuya cámara prismática (3) es también de sección rectangular pero cuya anchura es la del propio bloque antirreflejante (1), no dejando por lo tanto espacio libre cuando es situada de forma contigua a otro bloque idéntico. Dicho de otro modo, al colocarse dos bloques antirreflejantes (1) de forma continua para formar el muelle, no existe espacio libre o separación entre sus respectivas cámaras prismáticas (3), creando además cámaras complementarias cerradas (11).

A diferencia de los bloques antirreflejantes con cámaras prismáticas (3) en los que la separación entre cámaras prismáticas es el factor clave de su comportamiento antirreflejante, en el caso de reducir a cero la separación entre las cámaras prismáticas, el comportamiento de los bloques antirreflejantes (1) es el habitual de cámara doble perforada cuya respuesta dependerá sobretudo de la permeabilidad de las aberturas (9) y no de la singular dinámica de llenado/vaciado de la cámara prismática.

REIVINDICACIONES

1. Bloque para muelle antirreflejante **caracterizado** porque:

- comprende un espacio hueco abierto por su cara frontal y delimitado por paredes superior y posterior (6) del bloque; siendo la pared posterior impermeable;

- incluye una cámara prismática (3) situada en el interior del espacio hueco del bloque; la cámara prismática dispuesta próxima a la abertura frontal del espacio hueco y de forma que, una vez instalado el bloque en el muelle, el espacio hueco queda abierto por una separación entre cámaras prismáticas; la cámara prismática teniendo aberturas (9), perforaciones o ranuras; y

entre la cámara prismática y la pared posterior del bloque hay una distancia, formando un espacio abierto que constituye una cámara complementaria (4).

2. Bloque para muelle antirreflejante según reivindicación 1ª, **caracterizado** porque la cámara prismática (3) es de sección circular.

3. Bloque para muelle antirreflejante según reivin-

dicación 2ª, **caracterizado** porque las aberturas (9) de la cámara prismática (3) de sección circular son aberturas descentradas.

4. Bloque para muelle antirreflejante según reivindicación 2ª, **caracterizado** porque las aberturas (9) de la cámara prismática (3) de sección circular son aberturas axiales.

5. Bloque para muelle antirreflejante según reivindicación 1ª, **caracterizado** porque la cámara prismática (3) es de sección rectangular.

6. Bloque para muelle antirreflejante según reivindicación 1ª, **caracterizado** porque la cámara complementaria (4) esta dividida en compartimentos por medio de uno o varios tabiques (10).

7. Bloque para muelle antirreflejante según reivindicación 6, **caracterizado** porque los tabiques (10) cuentan con orificios (8) que favorecen la disipación adicional de energía.

8. Bloque para muelle antirreflejante según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado** porque en el interior y/o exterior de la cámara prismática (3) y/o en la cámara complementaria (4) se sitúan elementos de fricción.

25

30

35

40

45

50

55

60

65

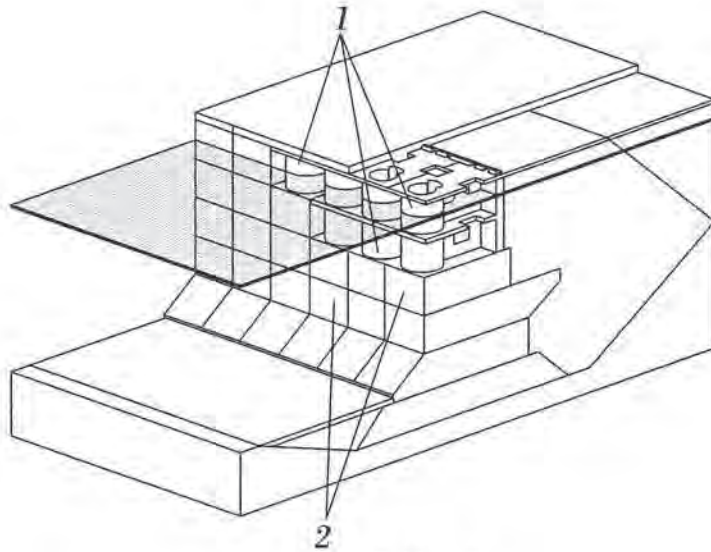


FIG. 1

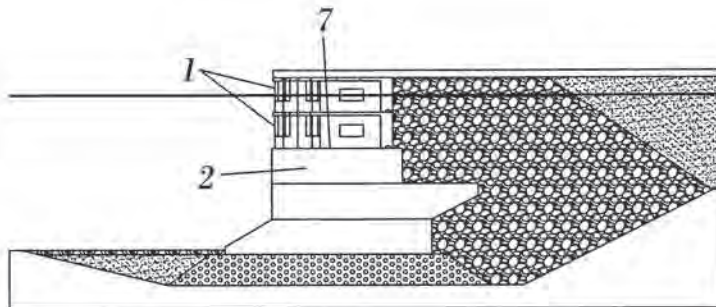


FIG. 2

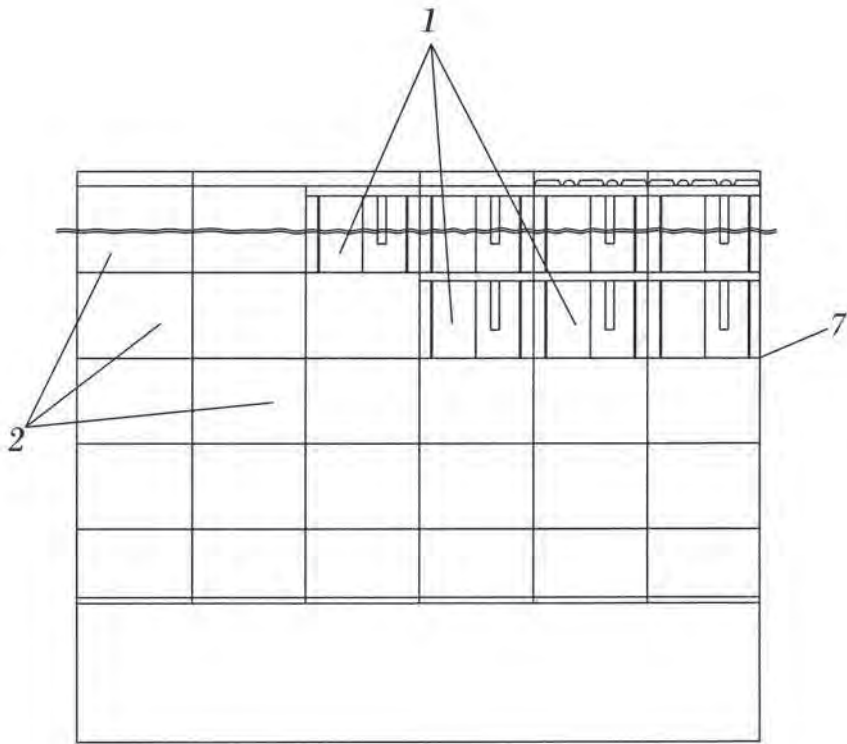


FIG. 3

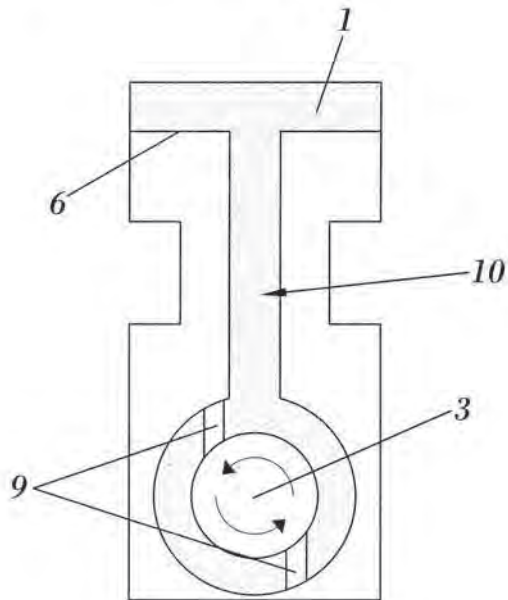
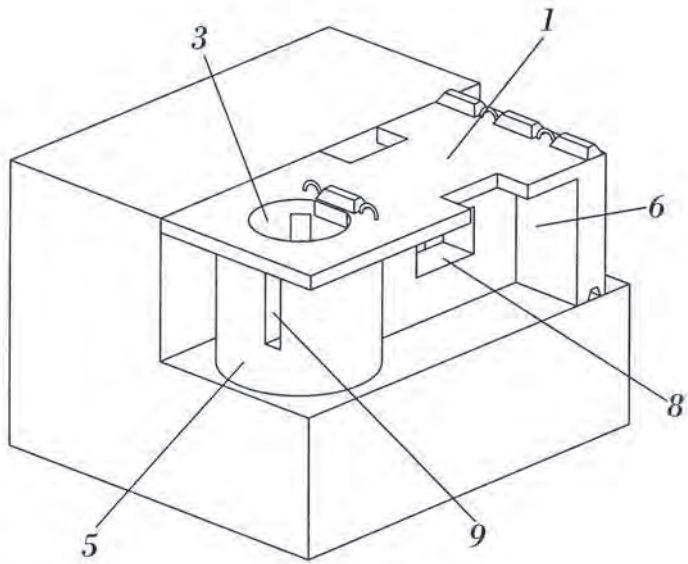


FIG. 4

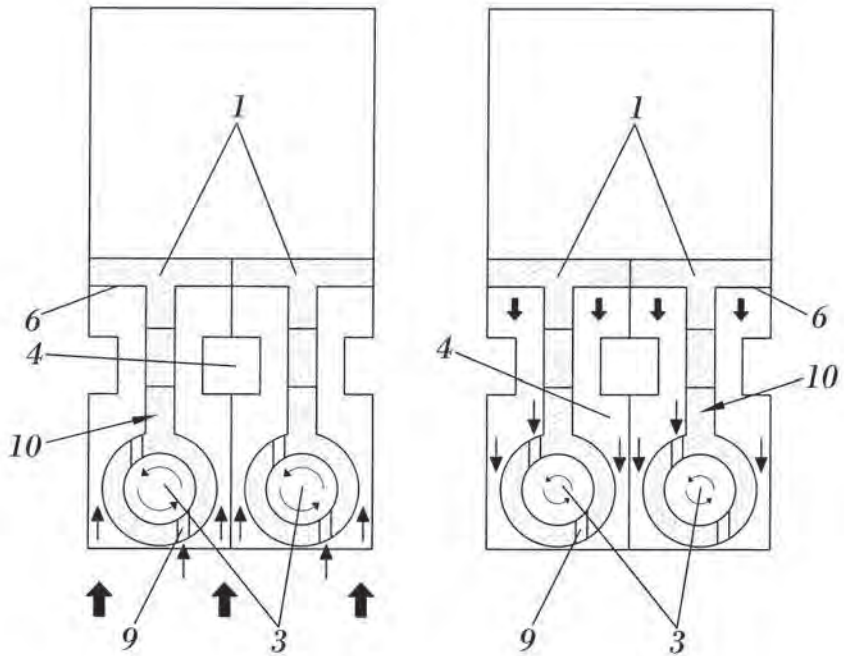


FIG. 5

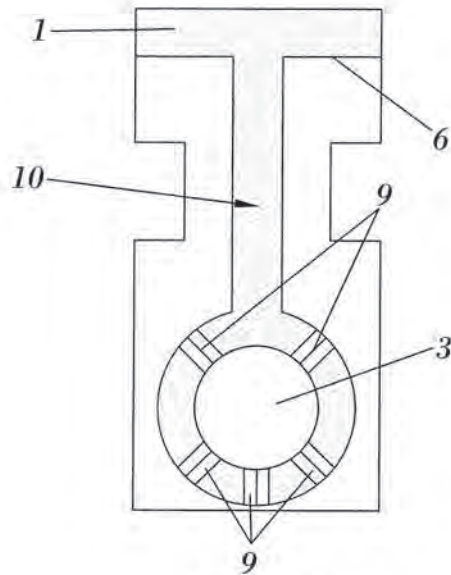
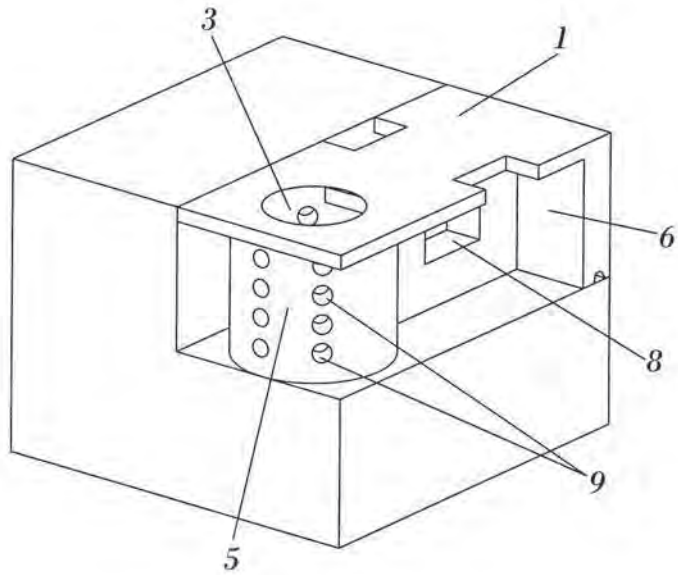


FIG. 6

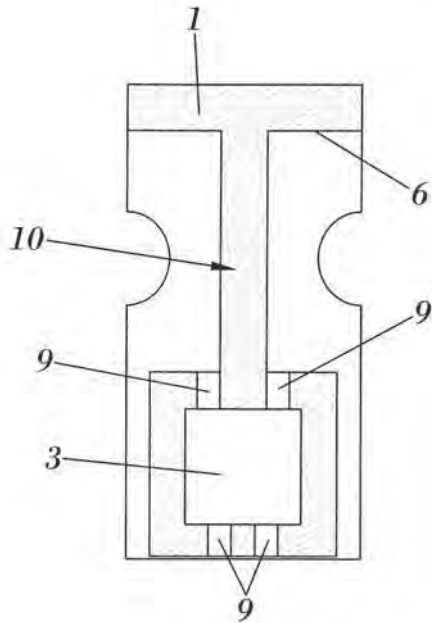
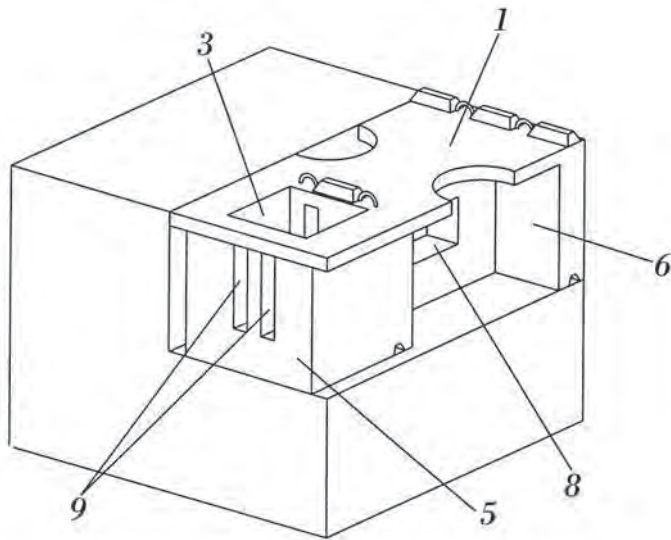


FIG. 7

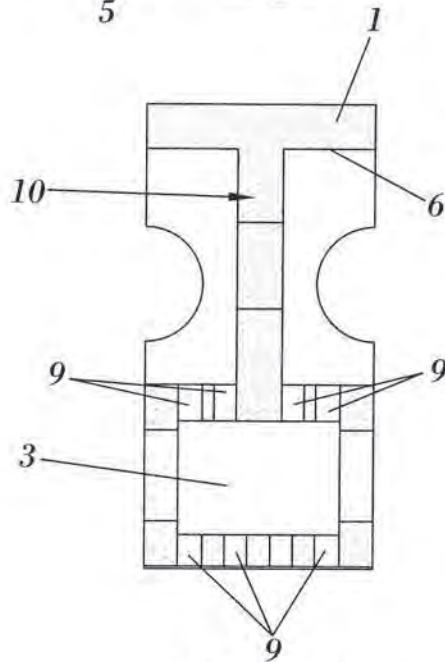
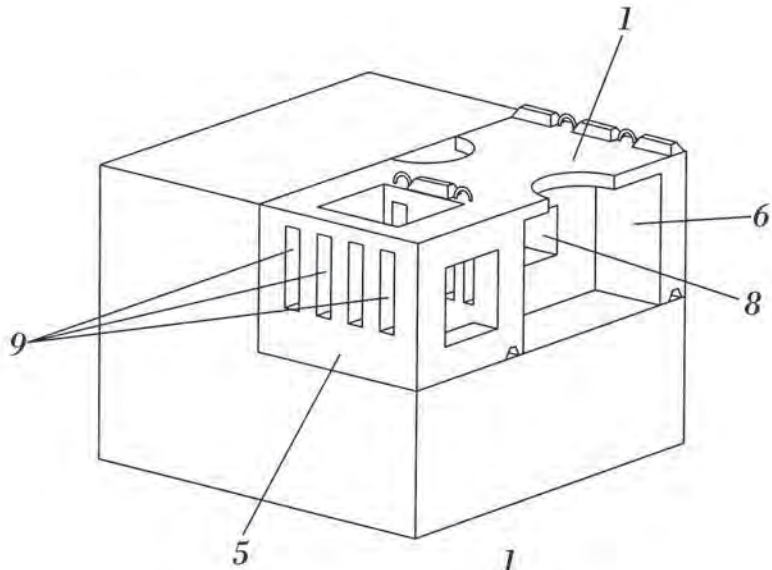


FIG. 8

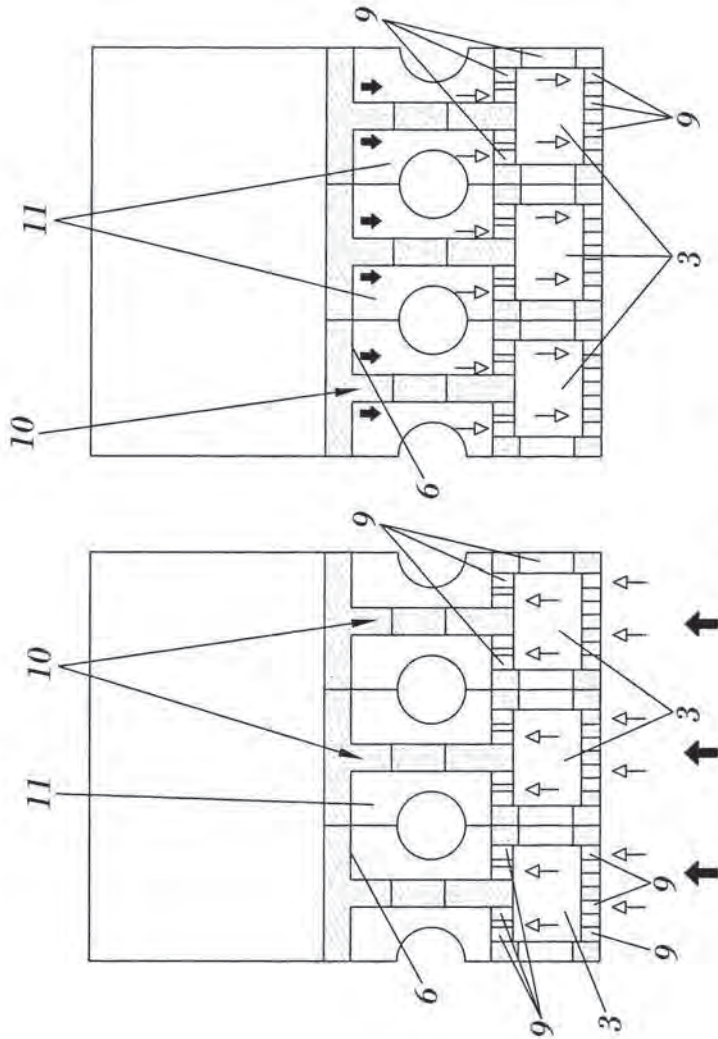


FIG. 9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 301 403

② N° de solicitud: 200603100

② Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2006

③ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: E02B 3/06 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X Y	GB 1523411 A (TOA HARBOR WORKS CO LTD) 31.08.1978, todo el documento.	1,5-8 2,4
X Y	KR 100650480 B1 (YOOIL ENGINEERING CONSULTANTS) 21.11.2006, figuras.	1,5-7,9 2,3
X A	US 4175888 A (IJIMA et al.) 27.11.1979, todo el documento.	1,5-7 4
X A	JP 2000144674 A (DAIO KENSETSU KK) 26.05.2000, resumen; figuras.	1,6,7 4,8,9
Y	JP 63312409 A (HAZAMA GUMI) 20.12.1988, resumen; figuras.	2-4

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n°:

Fecha de realización del informe
29.05.2008

Examinador
F. Calderón Rodríguez

Página
1/1



12 SOLICITUD DE PATENTE A1

22 Fecha de presentación: **24.11.2009**

43 Fecha de publicación de la solicitud: **02.06.2010**

43 Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
02.06.2010

71 Solicitante/s:
CONSTRUCCIONES Y ESTUDIOS S.A.
c/ General Urrutia, nº 75 - 2ª Planta
46013 Valencia, ES

72 Inventor/es: **Medina Folgado, Josep;**
González-Escriva, José Alberto;
Fort Alarcón, Lisardo Manuel;
Martínez Collado, Silvia María;
Dolores Balaguer, Camilo de los;
Ponce de León Cantavella, Daniel;
Manuel Alonso, José;
Yagüe Valdivieso, Diego;
Garrido Checa, Joaquín y
Berruguete Navarro, Antonio

74 Agente: **Ungría López, Javier**

54 Título: **Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje.**

57 Resumen:
Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje. La presente invención se refiere a una estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje, que comprende unas aberturas (4), (10), (11), (12), realizadas en el paramento frontal (3) de la estructura, una zona antirreflejante (9), que incorpora una o varias cámaras de disipación (6), aisladas entre sí, que están formadas por una pluralidad de unidades seleccionadas entre celdas (1) y bloques (2) de la estructura, interconectadas a través de aberturas intermedias (5) entre unidades adyacentes, siendo las paredes laterales y posterior (7) de la cámara de disipación impermeables, y tal que cada cámara de disipación, de al menos de una unidad de celda o bloque de anchura; y extendiéndose longitudinalmente en horizontal y a lo largo de al menos dos direcciones de circulación (8) distintas, así como a su uso como muelle, dique de abrigo, espaldón o margen de canal de navegación.

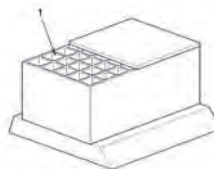


FIG. 1A

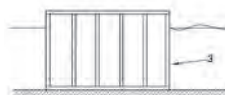


FIG. 1B

DESCRIPCIÓN

Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión de oleaje.

5 **Objeto de la invención**

Dentro del ámbito de las obras marítimas y portuarias, la presente solicitud de Patente de Invención proporciona una estructura adecuada para atenuar la reflexión del oleaje, conforme indica su enunciado.

10 La invención es aplicable a estructuras convencionales con paramento exterior vertical, es decir a estructuras marítimas verticales, incluyendo muelles y diques de abrigo verticales. Específicamente la invención es aplicable a muelles y diques verticales construidos a partir de cajones prefabricados de hormigón armado con celdas interiores de aligeramiento, en adelante estructuras de cajones, y a muelles a partir de bloques de hormigón, en adelante estructuras de bloques.

15 **Antecedentes de la invención**

Los muelles convencionales son estructuras marítimas para el atraque de buques y embarcaciones, que ofrecen un paramento vertical muy reflejante al oleaje y oscilaciones del agua en la dársena o área de flotación en la que se encuentran. Para atenuar la reflexión del oleaje y con ello la amplificación de la energía dentro de las dársenas o áreas de flotación próximas, es conocida la incorporación a la estructura de elementos constructivos complementarios para reducir la reflectividad en las áreas de flotación, como taludes protegidos con escollera, playas y muelles claraboya. Asimismo, se han desarrollado una variedad de tipologías de elementos constructivos antirreflejantes que permiten reducir la reflexión de forma más eficiente pero que presentan problemas diversos, destacando principalmente su escasa eficacia para atenuar la reflexión de ondas de baja frecuencia y periodos largos.

De otro lado, los diques de abrigo son obras marítimas para reducir hasta casi eliminar la transmisión de energía del oleaje, generando un espacio abrigado en el que poder establecer muelles, zonas de atraque y amarre y otros usos. Las tipologías fundamentales son el dique en talud o dique rompeolas y el dique vertical. El dique en talud cumple la función de abrigo provocando la rotura del oleaje sobre el talud y generando poca reflexión. El dique vertical cumple la función de abrigo reflejando la energía del oleaje incidente. La tipología en talud, con menor reflectividad, es la más conveniente para la navegación y el entorno, aunque en terrenos con cimentación competente la tipología vertical reduce los costes de la obra, además de evitar parte de los problemas de aprovisionamiento de materiales y de impacto ambiental, lo que favorece el uso de la tipología vertical frente a la tipología en talud. Para reducir los inconvenientes de la gran reflectividad de los diques verticales, de modo análogo a los muelles se han propuesto a lo largo del tiempo la incorporación de elementos constructivos complementarios. Al igual que en los muelles, en el caso de los diques verticales, se pretende minimizar los daños ambientales generados por el oleaje reflejado a la navegación y a las playas próximas.

40 Las estructuras marítimas verticales están siendo favorecidas por la necesidad de aprovechar los espacios portuarios al máximo y favorecer la operatividad portuaria. La presente invención se dirige a dichas estructuras marítimas verticales y tiene por objeto proporcionar la atenuación de la reflexión del oleaje sin necesidad de incorporar elementos constructivos antirreflejantes complementarios.

45 Para reducir la reflectividad de las estructuras marítimas verticales se han propuesto una serie de modificaciones estructurales a partir de la estructura conocida como de tipo Jarlan. La estructura de tipo Jarlan, que se recoge en la patente US-3118282, consiste en una cámara perforada que disipa, principalmente, la energía del oleaje por desfase del oleaje reflejado respecto del oleaje incidente entre la pared frontal permeable y la posterior impermeable.

50 En todas estas estructuras conocidas derivadas de las de tipo Jarlan los efectos técnicos para proporcionar la atenuación de la reflexión son la disipación de energía por turbulencia y fricción generada en la pared permeable y, sobretudo, la reducción de la reflexión por disipación de energía mediante el proceso de superposición de trenes de oleaje incidentes y reflejados con diferente ángulo de fase, sentido de propagación y dirección en su caso.

55 En el documento de patente ES-2262405, se describe una estructura vertical para la atenuación de la reflexión de las referidas anteriormente. Se trata de una estructura de cajón con al menos dos filas de celdas, en el que las dos primeras celdas se comunican entre si formando una cámara de disipación entre un paramento vertical ranurado y una pared posterior impermeable, quedando la cámara de disipación dividida por una abertura intermedia.

60 En el documento de patente JP-2002275855, se muestra una estructura vertical de muelle de bloques en la que se aplica también el concepto de estructura tipo Jarlan con la variante de que la atenuación de la reflexión del oleaje se realiza en una dirección transversal en vez de perpendicular al paramento vertical. La propia forma de los bloques permite que la cámara de disipación en vez de extenderse en la dirección perpendicular al paramento frontal de la estructura vertical, en el que incide el oleaje a atenuar, se extiende con cierta inclinación respecto a éste, y al igual que en dicha invención con una abertura intermedia.

Otras estructuras marítimas verticales conocidas adecuadas para reducir la reflectividad son tales como una fila de pilotes con una cierta permeabilidad (JP-62170606), pantallas múltiples ranuradas (US-4154548) o pantallas múltiples crecientes frente a los diques y muelles (EP-88440048).

5 Sin embargo, todas las soluciones antirreflejantes existentes para estructuras marítimas verticales presentan el inconveniente de su escasa eficacia para reducir la reflexión del oleaje de baja frecuencia. La ineficacia frente a las ondas de baja frecuencia se deriva del hecho de que la onda incidente tiene una primera reflexión en el paramento frontal o parte de la estructura más adelantada y la última reflexión en la parte más atrasada alcanzada por el flujo; si el tiempo de ida y vuelta del flujo entre el paramento frontal y el trasero es mucho menor que la mitad del período de la onda incidente, no hay interferencia significativa entre reflexiones y la eficacia antirreflejante es baja. En otras palabras, si la anchura de la zona antirreflejante del dique o muelle es mucho menor que la cuarta parte de la longitud de onda, la efectividad antirreflejante es muy baja. Ello conlleva la necesidad de reservar mucho espacio para la zona antirreflejante generando elevados costes de construcción con respecto a las tipologías convencionales. Así para construir diques verticales o muelles antirreflejantes que sean eficaces frente a oleaje de baja frecuencia, con períodos elevados asociados a grandes temporales y oleaje de fondo con longitudes de onda de más de 100 metros, sería necesaria una anchura de la zona antirreflejante mayor de 10 metros, inviable en la mayoría de muelles de bloques e inviable o muy costoso en diques o muelles de cajones al afectar a más de dos filas de celdas. Para frecuencias más bajas, con períodos de más de 30 segundos asociados a oleaje, grupos de olas, resonancia de dársenas y otras ondas de baja frecuencia, los bloques, que habitualmente tienen pocos metros de anchura, y los diques de cajones, que habitualmente tienen hasta 20 metros de anchura, no ofrecen la posibilidad de construir zonas antirreflejantes de anchura suficiente para atenuar la reflexión de las ondas de baja frecuencia.

En definitiva el problema técnico planteado en la presente invención es proporcionar una estructura marítima o portuaria vertical adecuada para la atenuación de la reflexión del oleaje y eficiente para el oleaje y las ondas de baja frecuencia.

Descripción de la invención

Para poder atenuar el oleaje y las ondas de baja frecuencia en estructuras marítimas verticales como muelles y diques verticales con las anchuras y métodos constructivos habituales, la invención incorpora diferentes cámaras de disipación con lo que se persigue la implementación de los efectos técnicos de las estructuras de tipo Jarlan. Novedosamente, las diferentes cámaras de disipación se extienden horizontalmente formando circuitos de varias unidades, de celdas o de bloques, a lo largo de diferentes direcciones permitiendo una extensión del recorrido de la circulación del flujo inducido por el oleaje, y aumentando así la eficacia antirreflexiva frente a las frecuencias más bajas.

Para una mejor comprensión de la presente invención, se introducen los siguientes conceptos que definen la estructura marítima vertical, objeto de la invención. Por "unidad" se entiende el bloque hueco en el caso de muelle de bloques y la celda en el dique o muelle de cajones de celdas; por "cámara de disipación" se entiende el conjunto de unidades interconectadas entre sí formando un circuito y aislado, a su vez, de otras "cámaras de disipación"; por "circuito" se entiende el espacio o la trayectoria recorrida por el flujo del oleaje a través de una cámara de disipación desde su incidencia hasta su disipación parcial y/o salida del sistema de atenuación en función de las características de la cámara establecida; por "frontal" se entiende la superficie delantera de la estructura vertical en la que incide el oleaje; por "lateral", se entiende cualquiera de las superficies verticales o sensiblemente verticales situadas en el interior de la cámara de disipación paralelamente a la dirección de circulación del flujo de oleaje; por "posterior" se entiende la superficie situada al final de la cámara de disipación; "superior" e "inferior" se refieren a las superficies horizontales o sensiblemente horizontales situadas encima y debajo de la cámara de disipación según la dirección de circulación; por "zona antirreflejante" se entiende el volumen con huecos de la estructura marítima vertical situada junto al paramento frontal que se destina a la atenuación de la reflexión y en la que se distribuyen las cámaras de disipación; y por "anchura de la zona antirreflejante" se entiende la máxima distancia en dirección perpendicular al paramento frontal entre dicho paramento y el punto más separado de la zona antirreflejante respecto a aquél.

La estructura marítima de la invención comprende una o varias cámaras de disipación abiertas por el paramento frontal. Cada cámara de disipación está formada por una pluralidad de unidades interconectadas a través de unas aberturas intermedias, extendiéndose horizontalmente en al menos dos direcciones de circulación distintas. La anchura típica de la cámara de disipación, medida perpendicularmente al flujo de oleaje, es de al menos una unidad, es decir la anchura que tiene la celda o el bloque tal como se dispone en la estructura. Por otra parte, la longitud de cada cámara de disipación viene determinada por la distancia recorrida por el flujo de oleaje en la cámara de disipación entre la superficie frontal y la posterior, o la mitad de la longitud del circuito de unidades si la cámara tiene dos aberturas frontales y carece de pared posterior.

La presente invención tiene por lo tanto como objeto una estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje que comprende:

- una zona antirreflejante, que incorpora una o varias cámaras de disipación, aisladas entre sí, abiertas por una o varias aberturas frontales del paramento frontal de la estructura;

- una o varias cámaras de disipación, que están formadas por una pluralidad de unidades interconectadas a través de aberturas intermedias entre dichas unidades adyacentes,

- paredes laterales y posterior impermeables de cada cámara de disipación que pueden contener piezas adicionales para aumentar las pérdidas de energía por fricción dentro de la cámara.

- la anchura de la cámara de disipación, siendo de al menos una unidad y

- la cámara de disipación, extendiéndose longitudinalmente en horizontal y a lo largo de al menos dos direcciones de circulación distintas.

Las unidades pueden ser celdas cuadradas, rectangulares o circulares, o bloques, cuadrados o rectangulares.

Según realizaciones particulares, la estructura marítima es un dique o muelle de cajones con celdas y en la que cada cámara de disipación está formada por una pluralidad de celdas interconectadas a través de aberturas intermedias entre celdas adyacentes, siendo las paredes laterales y posterior de la cámara de disipación impermeables.

Según realizaciones particulares adicionales, la estructura marítima es un muelle de bloques en el que cada cámara de disipación está formada por una pluralidad de bloques huecos interconectados a través de unas aberturas intermedias entre bloques adyacentes, siendo las paredes laterales y posterior de la cámara de disipación impermeables.

En cualquier realización de la invención, la longitud de la cámara de disipación puede ser mayor que la anchura de la zona antirreflejante de la estructura. Según realizaciones particulares dicha longitud es de al menos dos unidades de celda o bloque.

En la estructura marítima de la invención tanto la abertura frontal como las aberturas intermedias de las cámaras de disipación pueden ser ventanas, ranuras u orificios. Preferentemente, dichas aberturas tienen una permeabilidad tal que se mantiene igual o decrece en el recorrido de la cámara de disipación recorrida desde la abertura frontal hacia la pared posterior, o hacia la mitad de la longitud de la cámara de disipación si carece de pared posterior y tiene dos aberturas frontales.

Las celdas de la estructura marítima de cajones pueden tener distintas configuraciones definidas por secciones en planta tales como cuadradas, rectangulares, circulares o poligonales, siendo las más empleadas en la actualidad cuadradas o circulares.

Para el caso de que la estructura se forme con unidades - celdas o bloques - cuadradas, las direcciones de circulación se definen en la presente memoria como las diferentes direcciones paralelas a las paredes laterales de cada cámara de disipación, estando cada dirección definida por al menos dos unidades, celdas o bloques. Para el caso de que la estructura se forme con unidades circulares, las direcciones de circulación se definen en la presente memoria como las direcciones paralelas al plano vertical tangente exterior a las unidades circulares que configuran la pared lateral de la cámara de disipación, estando cada dirección definida por al menos dos unidades. Análogamente se definiría el concepto de dirección de circulación cuando las unidades no fueran circulares o cuadradas, con objeto de referirse a una dirección de circulación principal del flujo de oleaje.

La invención proporciona cámaras de disipación que forman circuitos de unidades de longitud mayor que la anchura de la zona antirreflejante del dique o muelle. El número y la longitud óptima de las cámaras de disipación que albergan los circuitos antirreflejantes de unidades múltiples en diques y muelles dependerá del clima marítimo y oleaje incidente, por un lado, y de las características de los buques y embarcaciones, por otro. Cuando las ondas incidentes cuya reflexión se desea atenuar no tengan baja frecuencia, puede ser conveniente utilizar simplemente la disposición de cámaras convencionales tipo Jarlan con una anchura de la zona antirreflejante mayor del 10% de la longitud de onda. Si se desea atenuar ondas de muy baja frecuencia, como son las ondas de resonancia en dársenas, entonces serán especialmente apropiados los circuitos antirreflejantes de unidades múltiples de gran longitud; en este caso, aunque el paramento frontal de la estructura vertical resultaría impermeable en su mayor parte para una anchura de zona antirreflejante fijada, las pocas zonas permeables serán muy eficaces en la reducción de la reflexión de ondas de muy baja frecuencia.

La presente invención da una respuesta eficaz al problema de reducir la reflectividad de muelles y diques verticales frente al oleaje y ondas de periodos altos, sin incrementar la anchura de la zona antirreflejante de la estructura. Constituye además una solución factible desde el punto de vista constructivo, a la vez que económicamente viable. Además, las cámaras de disipación con circuitos antirreflejantes de unidades múltiples objeto de la invención son aplicables no sólo a estructuras verticales de bloques o de cajones, sino también a contornos de dársena, espaldones, canales de navegación y, en general, estructuras de paramento sensiblemente vertical para las que se desea reducir su reflectividad frente al oleaje y oscilaciones del mar de baja frecuencia tales como oleaje y oscilaciones asociadas a grandes temporales, ondas de resonancia en dársenas, etc.

Más concretamente, las cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples de la presente invención, se pueden definir para dos tipos de estructuras verticales: (a) estructuras verticales de cajones para diques o muelles a más de 10 metros de profundidad y (b) estructuras verticales de bloques para muelles construidos en dársenas a menos de 18 metros de profundidad. En el caso de las estructuras de cajones, la parte superior de la fila o las filas frontales de celdas de dichos cajones se modifica hasta una cierta profundidad para formar celdas inundables conectadas entre sí creando circuitos, aislados a su vez de otros circuitos; estos circuitos tienen un extremo abierto al exterior en la pared frontal y otro extremo cerrado e impermeable comprendiendo una longitud aproximada del 10% al 20% de la

- longitud de onda media de las ondas cuya reflexión se quiere reducir, o bien dos extremos abiertos al exterior en la pared frontal, de una longitud aproximada del 20% al 40% de la longitud de onda media de las ondas cuya reflexión se quiere reducir. En el caso de muelles de bloques, se pueden fabricar "in situ" o utilizar elementos modulares antirreflejantes prefabricados previamente en tierra para sustituir la fila o filas superiores de bloques creando con ellos
- 5 cámaras de disipación con circuitos de bloques de mayor longitud que la unidad de bloque en el muelle; en caso de utilizar bloques huecos, los elementos sólo tendrán dos caras verticales permeables por donde pueda fluir el agua al siguiente bloque del circuito, excepto el elemento situado en el extremo de cada circuito que sólo tendrá la cara permeable de entrada a una unidad sin conexiones con otras unidades en el plano horizontal.
- 10 De esta forma, aunque el muelle o dique tenga una zona antirreflejante de pocos metros de anchura - típicamente 4 metros en muelles de bloques y 7 metros en muelles y diques de cajones -, las cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples permiten una reducción eficaz de la reflexión de ondas de periodos altos y no sólo de ondas de acompañamiento y periodos pequeños de oleaje. Por otro lado, la posibilidad de disponer de circuitos de unidades múltiples de mayor o menor longitud con la misma anchura de zona antirreflejante en diques y muelles, permite
- 15 adaptarse a las condiciones locales del oleaje y las ondas largas que inciden sobre la estructura, lo que posibilita, por tanto, realizar diseños óptimos específicos adaptados a las condiciones locales de cada tramo de obra. Por ejemplo, los cajones utilizados en el dique de abrigo de un puerto comercial pueden tener circuitos de unidades múltiples de una gran longitud, adecuada para reducir la reflectividad de los temporales máximos anuales más frecuentes, que suelen ser los responsables habituales del cierre del puerto; los cajones utilizados en los muelles más expuestos al oleaje
- 20 que penetra desde la bocana pueden tener circuitos de celdas múltiples de menor longitud, adecuada para reducir la reflectividad de los temporales que mayor agitación interior generan cada año, y los cajones situados en zonas muy abrigadas del puerto pueden tener circuitos de unidades múltiples de mucha mayor longitud, adecuada para reducir la reflectividad de las ondas largas asociadas a los grupos de olas de los temporales, la resonancia de dársenas y otras ondas de baja frecuencia. Es decir, en lugar de tener que aplicar prácticamente la misma solución en cualquier
- 25 situación, las cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples permiten adaptar fácilmente los cajones o bloques para obtener la reducción de reflectividad idónea en cada tramo de dique o muelle de un puerto sin ampliar la anchura de la zona antirreflejante.
- A diferencia de los sistemas antirreflejantes convencionales con cámaras de disipación de una o dos unidades, en
- 30 los que la permeabilidad óptima del paramento frontal e intermedio se sitúa alrededor del 30% e influye de manera determinante en la reducción de la reflexión, en los circuitos de unidades múltiples las permeabilidades óptimas son mayores y, en el caso de cajones con celdas circulares y cuadradas o rectangulares, la permeabilidad máxima vendrá normalmente limitada por razones constructivas. Deben cuidarse dos reglas generales para establecer las permeabilidades dentro de cada circuito: (a) las permeabilidades de entrada a cada unidad deben mantenerse o decrecer desde el
- 35 paramento exterior hacia el interior y (b) deben buscarse permeabilidades medias mayores si la longitud de la cámara de disipación es mayor y la profundidad del agua dentro de las cámaras es menor. Aproximadamente puede usarse la relación porosidad media = $20\% + 10\% [N^{1/2} + (h/hc)^{1/4}]$, donde N es la longitud de la cámara de disipación medida en número de unidades del circuito y h/hc es la relación entre la profundidad media de la dársena en la que se encuentra la estructura marítima vertical y la de la cámara de disipación. Así por ejemplo, si la profundidad de la cámara de disipación es un quinto de la profundidad de la dársena, h/hc = 5 y si la cámara de disipación está compuesta por un
- 40 circuito formado por una unidad abierta frontal, cuatro intermedias y una posterior, el circuito final tiene una longitud de N = 6 unidades, entonces las permeabilidades óptimas son aproximadamente p1 y p2 = 70% para la entrada a la unidad frontal y la unidad contigua, p3 y p4 = 60% para las entradas de la tercera y cuarta unidad del circuito, y p5 y p6 = 50% para la entrada a la quinta unidad y la entrada a la unidad posterior. Si la cámara de disipación no tiene
- 45 unidad posterior cerrada y está formada por dos unidades abiertas a la pared frontal y cuatro intermedias, la longitud efectiva es la mitad, N = 6/3, ya que el flujo penetra desde el paramento frontal hacia el interior y las permeabilidades aproximadas que deben usarse son 55% para las entradas a las dos unidades abiertas al paramento frontal, 50% para las entradas de las unidades contiguas a las frontales y 45% para el resto de conexiones entre unidades internas de la cámara de disipación.
- 50 Con objeto de aumentar la estabilidad y los mecanismos de disipación de energía dentro de las cámaras de disipación, las unidades pueden llenarse parcialmente de elementos resistentes tales como piedras, piezas prefabricadas u otros elementos específicos que aumenten la pérdida de energía por fricción y el peso de la estructura.
- 55 Así pues, las celdas parcialmente abiertas y conectadas de las estructuras de cajones para diques y muelles, o bien los bloques de los muelles, pueden formar cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples de una longitud mayor que la anchura de la zona antirreflejante para poder reducir eficazmente la reflectividad de oleaje y ondas de baja frecuencia y adaptarse mejor a las condiciones locales de agitación en cada tramo de muelle o dique. Puede decirse que la efectividad antirreflejante de los circuitos de unidades múltiples depende fundamentalmente de tres factores: (a)
- 60 la anchura de la zona antirreflejante, (b) la profundidad del agua dentro de las cámaras de disipación y (c) la longitud de los mismos; los dos primeros factores suelen venir condicionados por razones constructivas y el tercer factor es el que debe decidirse en cada caso para reducir con la mayor eficacia posible el oleaje y las ondas incidentes en cada tramo de obra.
- 65 La formación de cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples en cajones para diques y muelles lleva implícito el aislamiento horizontal de unos circuitos de otros, ya que las celdas de los cajones están aisladas y sólo se abren o conectan las celdas correspondientes a cada circuito de la longitud deseada para provocar un flujo de entrada y salida básicamente horizontal. En el caso de circuitos de unidades múltiples formados en muelles de bloques, hay que

cuidar que no haya conexión entre bloques de diferentes circuitos; los circuitos de unidades de bloques se definen en el plano horizontal y pueden tener conexiones verticales entre pares de bloques o elementos situados unos encima de otros, pero no puede haber flujo a través de conexiones horizontales entre bloques de diferentes circuitos. Como regla general, tampoco debe haber comunicación entre unidades de la misma cámara de disipación que no se hayan definido como contiguas dentro del circuito de unidades, ya que ello reduciría la longitud efectiva del circuito.

Descripción de los dibujos

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica del mismo, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

La figura 1.- Muestra una representación de una estructura marítima vertical de celdas a la cual se dirige la presente invención, correspondiendo en concreto a un muelle de cajones, en perspectiva (1A) y en sección del alzado (1B).

La figura 2.- Muestra una representación de una estructura marítima vertical de bloques a la cual se dirige la presente invención, en perspectiva (2A) y en sección del alzado (2C). También se muestran dos tipologías diferentes de elementos de bloque para formar las cámaras de disipación de unidades múltiples (2B).

La Figura 2B muestra dos bloques típicos, uno preferente de la fila delantera (el de ranuras) y otro preferente de la fila trasera.

La figura 3.- Muestra una representación de un dique de abrigo vertical de cajones con celdas cuadradas según la invención, en perspectiva (3A) y en planta esquemática (3B), con una zona antirreflejante de 2 celdas de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de diversas longitudes: 6 unidades (B-B'), 5 unidades (D-D'), 4 unidades (A-A') y 3 unidades (C-C), que permite reducir la reflexión de ondas de un amplio rango de periodos.

La figura 4.- Muestra una representación de un dique vertical de cajones con celdas circulares según la invención, en perspectiva (4A) y en planta esquemática (4B), con una zona antirreflejante de 2 unidades de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de diversas longitudes: 4 unidades (A-A', C-C' y D-D') y 3 unidades (B-B').

La figura 5.- Muestra una representación de un muelle de cajones de celdas cuadradas según la invención, en perspectiva (5A) y en planta esquemática (5B), con una zona antirreflejante de 2 unidades de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de la misma longitud: 4 unidades (A-A', B-B', C-C' y D-D'). Las celdas que forman el circuito BB' cuentan además con elementos que incrementan la rugosidad en el lecho de la cámara de disipación y que, como se ha comentado en la presente memoria, aumentan las pérdidas de la energía del oleaje por fricción.

La figura 6.- Muestra una representación de un muelle de cajones de celdas cuadradas según la invención, en perspectiva (6A) y en planta esquemática (6B). En la figura 6B, se muestra el muelle con una zona antirreflejante de 2 unidades de anchura y donde se han formado tres circuitos de unidades múltiples largos de 5 unidades de longitud (A-A', C-C' y E-E'), tres unidades aisladas (B-B', D-D' y F-F'). Estas soluciones son apropiadas para reducir la reflexión tanto de ondas de periodos altos como también bajos, pero menos eficiente en los periodos intermedios.

Realización preferente de la invención

Las figuras 1, 2 y 3 muestran estructuras marítimas verticales a las que se dirige la invención: muelle de cajones (figura 1), muelle de bloques (figura 2) y dique vertical de cajones (figura 3).

En las figuras 3, 4, 5 y 6, puede observarse como las cámaras de disipación con los circuitos de unidades múltiples (6) se pueden formar a partir de una estructura de cajones de celdas (1) cuadradas (figuras 3, 5 y 6) o circulares (figura 4) realizando aberturas frontales (4) en el paramento frontal (3) y aberturas intermedias (5), incluyendo ventanas (10), ranuras (11) u orificios (12) en la zona próxima al nivel medio del mar, formando así cámaras de disipación (6) con un número de unidades adecuado para el periodo de las ondas cuya reflexión se desea reducir.

Análogamente, se formarían las cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples (6) en estructuras marítimas verticales de bloques (2), disponiendo los elementos huecos tipo bloque con aberturas frontales (4) y aberturas intermedias (5) incluyendo ventanas (10), ranuras (11) u orificios (12) como se muestran en la figura 2A, a través de las que se interconectan los distintos bloques que forman la cámara de disipación (6) con el circuito de la longitud deseada.

Las cámaras de disipación con los circuitos de unidades múltiples pueden formarse de longitudes variadas como en la figura 3 para ser eficaces en la atenuación de la reflexión de ondas de un amplio rango de frecuencias bajas y no ser mucho menos eficaces en la atenuación de la reflexión de ondas de frecuencias altas. Las aberturas intermedias (5) de las celdas (1) o bloques (2) pueden ser de tipo ventana (10) (figuras 3 y 4), ranuras (11) (figuras 5A y 5B) y orificios (12) (figuras 6A y 6B).

Los circuitos de unidades múltiples o cámaras de disipación (6) también pueden formarse de longitudes similares como en la figura 5 para ser más eficaces en la atenuación de la reflexión de ondas en un rango no muy amplio de frecuencias bajas y ser menos eficaces en la atenuación de la reflexión de ondas de frecuencias altas.

- 5 Las cámaras de disipación con los circuitos de unidades múltiples (6) pueden formarse de longitudes iguales con circuitos repetitivos como se muestra en la figura 5B, que siempre atenuarán de forma más eficaz la reflexión de las ondas de mayor periodo y de forma menos eficaz las ondas de menor periodo.

- 10 Las cámaras de disipación con circuitos largos de muchas unidades pueden construirse junto con unidades antirreflejantes aisladas como en la figura 6B para ser eficaces simultáneamente en la atenuación de la reflexión de ondas de frecuencia muy baja, como el oleaje de fondo y también de ondas de frecuencia muy alta, como las ondas de acompañamiento de buques. Las aberturas intermedias (5) entre celdas (1) o bloques (2) contiguos de la misma cámara de disipación han de ser permeables. Como regla general, tendrán menor permeabilidad las paredes frontales de las celdas o bloques aislados y las paredes entre las unidades más internas de los circuitos de unidades múltiples, siendo de mayor permeabilidad las paredes entre unidades de circuitos más largos y entre unidades más próximas al paramento frontal.

- 20 Finalmente, los circuitos de unidades múltiples pueden ser muy largos para tener la máxima eficacia en la atenuación de la reflexión de ondas de más baja frecuencia, como las ondas de resonancia de dársenas, aunque resulten muy poco eficaces para atenuar la reflexión de las ondas de acompañamiento de alta frecuencia.

- 25 Las celdas o bloques de la cámara de disipación pueden rellenarse parcialmente de elementos que incrementan la rugosidad del lecho de la cámara de disipación como piedras (14) u otros elementos como se muestra en la figura 5A para aumentar la pérdida de energía por fricción en el flujo de entrada y salida del circuito, colaborando en la atenuación de la energía reflejada.

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje, **caracterizada** porque comprende
- 5 - unas aberturas (4), (10), (11), (12), realizadas en el paramento frontal (3) de la estructura,
- una zona antirreflejante (9), que incorpora
- 10 - una o varias cámaras de disipación (6), aisladas entre sí, que están formadas por
- una pluralidad de unidades seleccionadas entre celdas (1) y bloques (2) de la estructura, interconectadas a través de aberturas intermedias (5) entre unidades adyacentes, siendo las paredes laterales y posterior (7) de la cámara de disipación impermeables,
- 15 - cada cámara de disipación, de al menos de una unidad de celda o bloque de anchura; y extendiéndose longitudinalmente en horizontal y a lo largo de al menos dos direcciones de circulación (8) distintas.
2. Estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje según la reivindicación 1, **caracterizada** porque las unidades son seleccionadas entre celdas cuadradas, rectangulares o circulares, y bloques, de sección cuadrada o rectangular.
- 20 3. Estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje, según la reivindicación 1, **caracterizada** porque es una estructura de cajones con celdas y en la que la cámara de disipación está formada por una pluralidad de celdas (1) interconectadas a través de aberturas intermedias (5) entre celdas adyacentes, siendo las paredes laterales y posterior (7) de la cámara de disipación impermeables.
- 25 4. Estructura marítima vertical para la atenuación de reflexión de oleaje según la reivindicación 1, **caracterizada** porque la cámara de disipación está formada por una pluralidad de bloques (2) de la estructura interconectados a través de unas aberturas intermedias (5) entre bloques adyacentes.
- 30 5. Estructura marítima vertical según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada** porque la longitud de la cámara de disipación es mayor que la anchura de la zona antirreflejante (9) de la estructura.
- 35 6. Estructura marítima vertical según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada** porque la longitud de la cámara de disipación es de dos o más unidades de celda (1) o bloque (2).
7. Estructura marítima vertical según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada** porque la abertura frontal (4) y las aberturas intermedias (5) se seleccionan del grupo consistente en ventanas (10), ranuras (11) y orificios (12).
- 40 8. Estructura marítima vertical según la reivindicación 7, **caracterizada** porque la abertura frontal (4) y las aberturas intermedias (5) tienen una permeabilidad tal que se mantiene igual o decrece en la dirección de la longitud de la cámara de disipación recorrida desde la abertura frontal (4) hacia el interior.
- 45 9. Estructura marítima vertical según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada** porque la cámara de disipación (6) contiene elementos específicos (14) que incrementan la rugosidad del lecho de la cámara para aumentar la fricción y la pérdida de energía del oleaje incidente.
- 50 10. Estructura marítima vertical según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizada** porque la cámara de disipación (6) comprende una o varias aberturas (13) en la pared superior seleccionadas entre ventanas (10), ranuras (11) y/u orificios (12).
- 55 11. Uso de la estructura marítima vertical definida en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 10, como muelle.
12. Uso de la estructura marítima vertical definida en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 10, como dique de abrigo.
- 60 13. Uso de la estructura marítima vertical definida en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 10, como espaldón.
14. Uso de la estructura marítima vertical definida en una cualquiera de las reivindicaciones anteriores 1 a 10, como margen de canal de navegación.
- 65

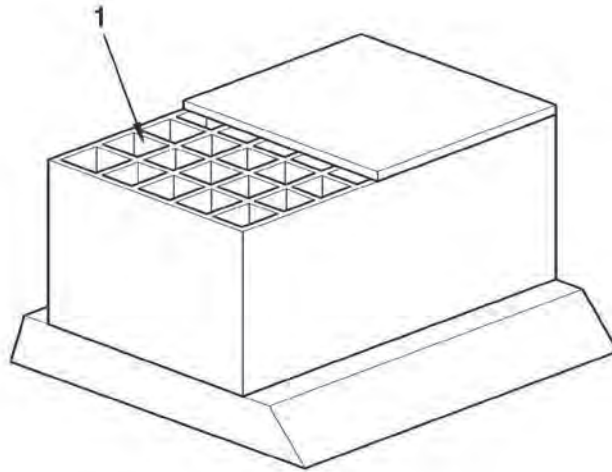


FIG. 1A

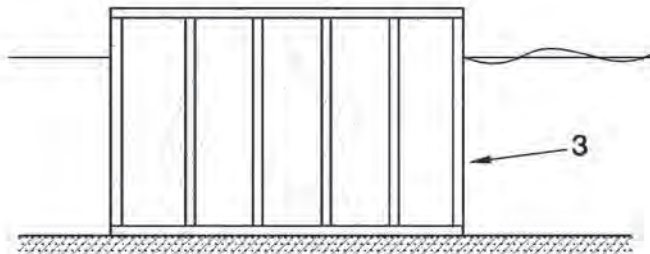


FIG. 1B

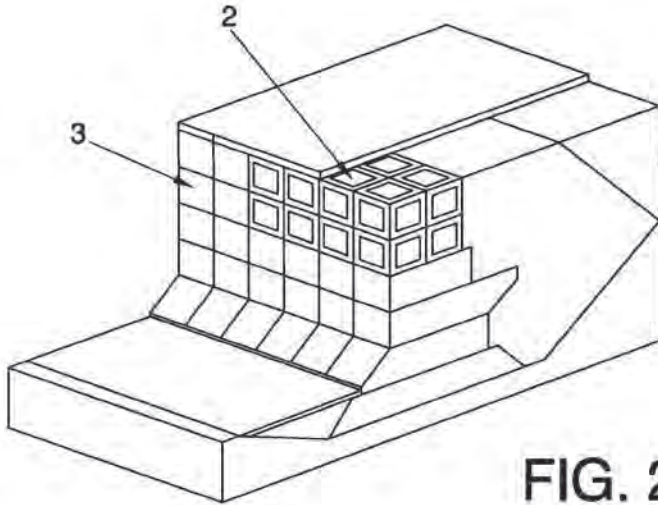


FIG. 2A

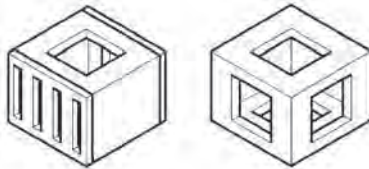


FIG. 2B

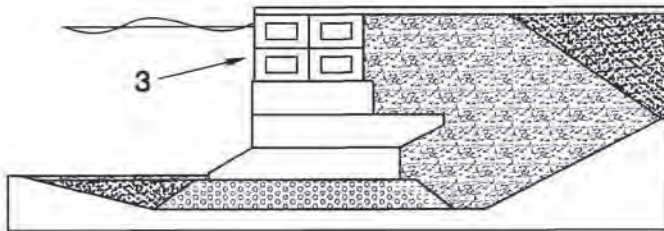


FIG. 2C

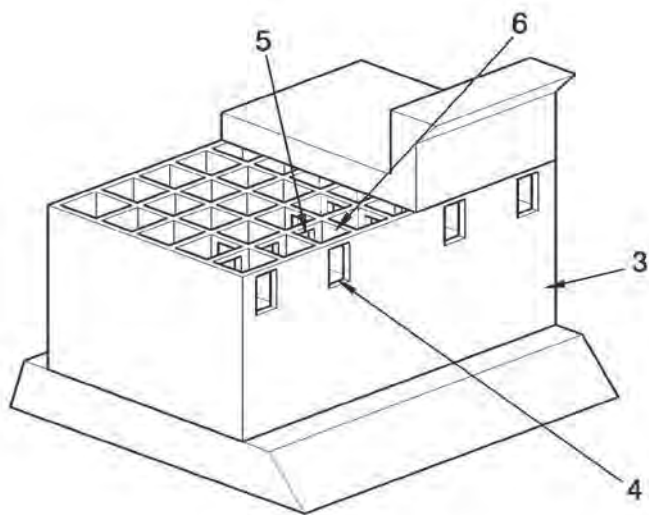


FIG. 3A

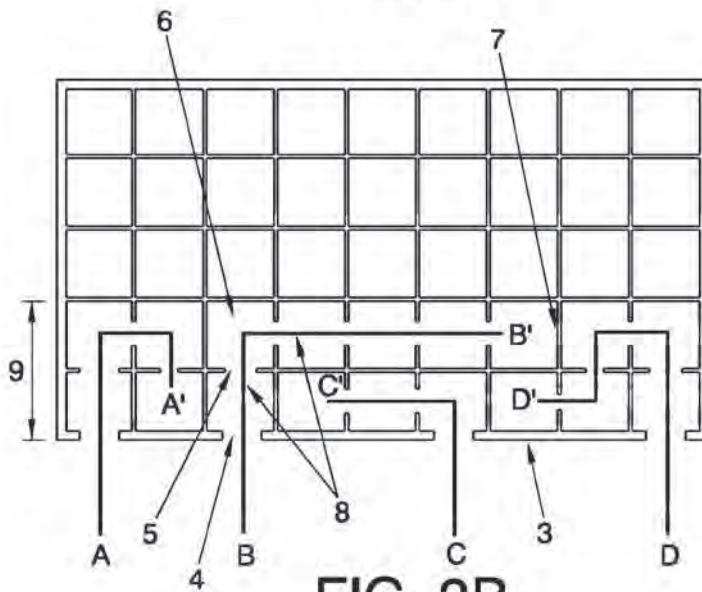


FIG. 3B

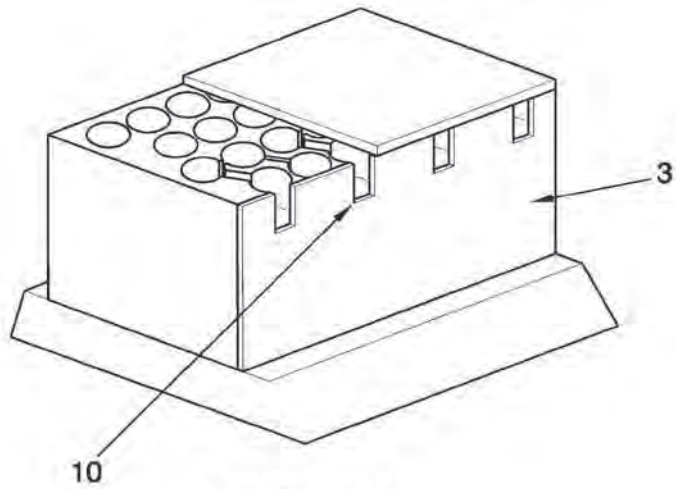


FIG. 4A

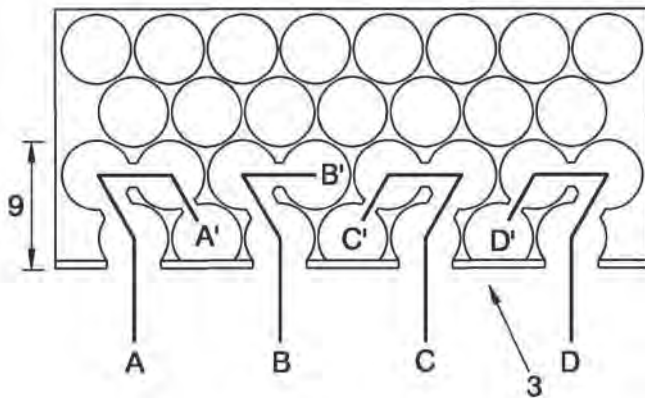


FIG. 4B

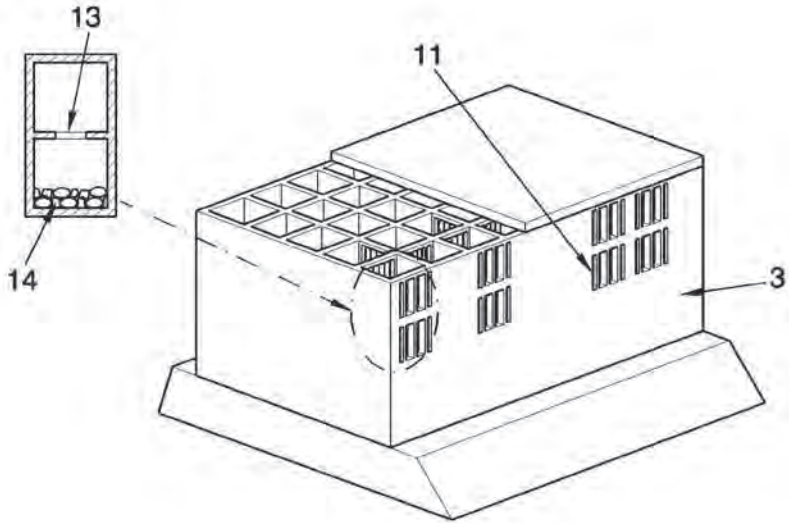


FIG. 5A

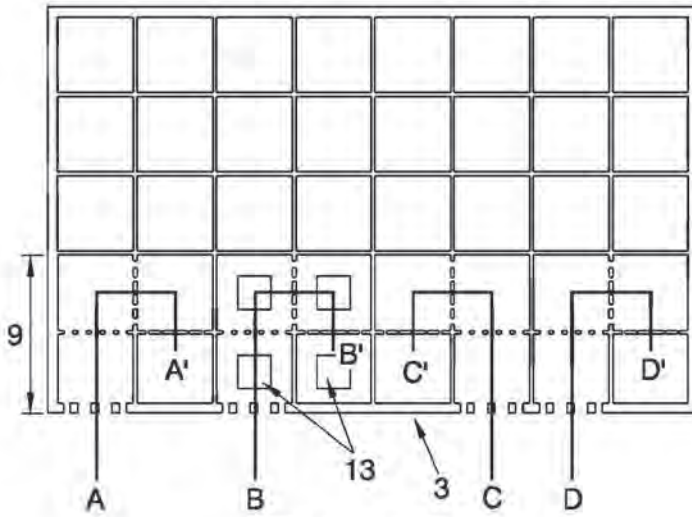


FIG. 5B

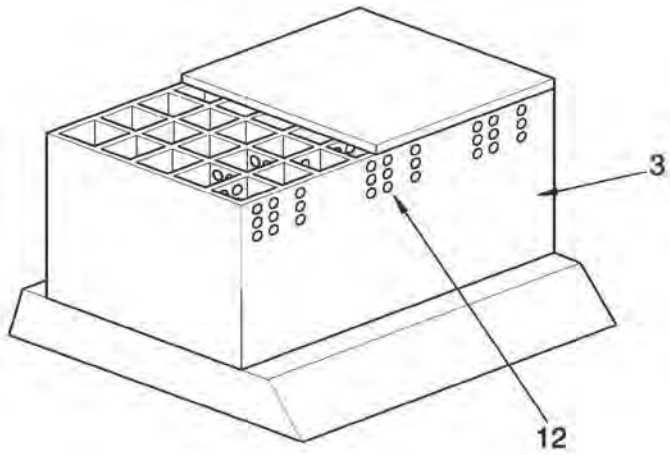


FIG. 6A

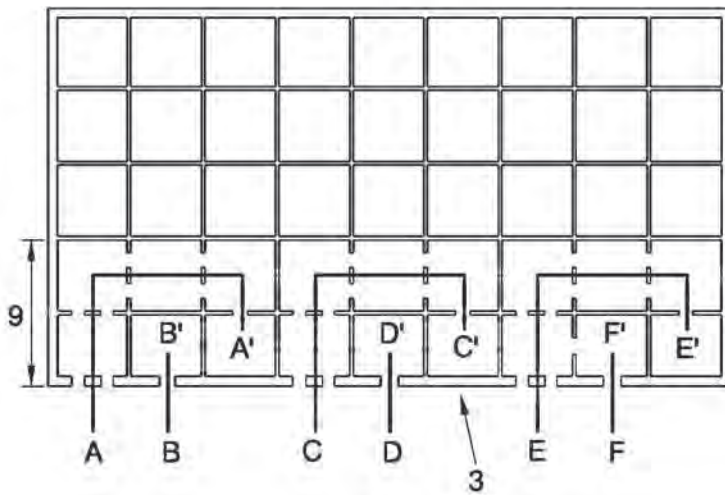


FIG. 6B



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 340 460

② N° de solicitud: 200931049

② Fecha de presentación de la solicitud: 24.11.2009

③ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: E02B 3/06 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	JP 2002275855 A (PENTA OCEAN CONSTRUCTION) 25.09.2002, figuras & Resumen de la base de datos EPODOC. Recuperado de EPOQUE; AN JP-2001080538-A.	1-7
Y		8-10
X	ES 2262405 A1 (FCC CONSTRUCCION S A) 16.11.2006, columna 1, líneas 21-25; columna 4, líneas 17-54; columna 9, líneas 14-24; columna 10, líneas 1-4.	1-4,7, 11-14
Y	FR 730189 A (GRUEN & BILFINGER AG) 08.08.1932, página 2, líneas 5-17,57-64; figura 1.	8,10
Y	JP 2008014063 A (PENTA OCEAN CONSTRUCTION) 24.01.2008, figuras & Resumen de la base de datos EPODOC. Recuperado de EPOQUE; AN JP-2006187632-A.	9

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n°:

Fecha de realización del informe
17.05.2010

Examinador
F. Calderón Rodríguez

Página
1/5

Anexo D. Resultados de ensayos

Anexo D.1. Oleaje regular

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS												REGISTRADO (dominio tiempo)												INCIDENTE (dominio frecuencia)												INCIDENTE (dominio tiempo)																																
DT	PS	BL	BL	BL	BL	B	Y	H	H	H	H	Min	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Min	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Min	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Min	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un	Un
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05									
0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05	0.07	0.17	0.35	0.73	0.81	100.29	4.21	0.79	1.01	0.05	0.72	0.05									

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS												REGISTRADO (dominio frecuencia)												INCIDENTE (dominio tiempo)												INCIDENTE (dominio frecuencia)																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
DT	DS	BL	BL2	BL3	BL4	B	V	H	Hens	Tn	Ts	Ua	Ua1	Ua2	Ua3	Ua4	Ua5	Ua6	Ua7	Ua8	Ua9	Ua10	Ua11	Ua12	Ua13	Ua14	Ua15	Ua16	Ua17	Ua18	Ua19	Ua20	Ua21	Ua22	Ua23	Ua24	Ua25	Ua26	Ua27	Ua28	Ua29	Ua30	Ua31	Ua32	Ua33	Ua34	Ua35	Ua36	Ua37	Ua38	Ua39	Ua40	Ua41	Ua42	Ua43	Ua44	Ua45	Ua46	Ua47	Ua48	Ua49	Ua50	Ua51	Ua52	Ua53	Ua54	Ua55	Ua56	Ua57	Ua58	Ua59	Ua60	Ua61	Ua62	Ua63	Ua64	Ua65	Ua66	Ua67	Ua68	Ua69	Ua70	Ua71	Ua72	Ua73	Ua74	Ua75	Ua76	Ua77	Ua78	Ua79	Ua80	Ua81	Ua82	Ua83	Ua84	Ua85	Ua86	Ua87	Ua88	Ua89	Ua90	Ua91	Ua92	Ua93	Ua94	Ua95	Ua96	Ua97	Ua98	Ua99	Ua100	Ua101	Ua102	Ua103	Ua104	Ua105	Ua106	Ua107	Ua108	Ua109	Ua110	Ua111	Ua112	Ua113	Ua114	Ua115	Ua116	Ua117	Ua118	Ua119	Ua120	Ua121	Ua122	Ua123	Ua124	Ua125	Ua126	Ua127	Ua128	Ua129	Ua130	Ua131	Ua132	Ua133	Ua134	Ua135	Ua136	Ua137	Ua138	Ua139	Ua140	Ua141	Ua142	Ua143	Ua144	Ua145	Ua146	Ua147	Ua148	Ua149	Ua150	Ua151	Ua152	Ua153	Ua154	Ua155	Ua156	Ua157	Ua158	Ua159	Ua160	Ua161	Ua162	Ua163	Ua164	Ua165	Ua166	Ua167	Ua168	Ua169	Ua170	Ua171	Ua172	Ua173	Ua174	Ua175	Ua176	Ua177	Ua178	Ua179	Ua180	Ua181	Ua182	Ua183	Ua184	Ua185	Ua186	Ua187	Ua188	Ua189	Ua190	Ua191	Ua192	Ua193	Ua194	Ua195	Ua196	Ua197	Ua198	Ua199	Ua200	Ua201	Ua202	Ua203	Ua204	Ua205	Ua206	Ua207	Ua208	Ua209	Ua210	Ua211	Ua212	Ua213	Ua214	Ua215	Ua216	Ua217	Ua218	Ua219	Ua220	Ua221	Ua222	Ua223	Ua224	Ua225	Ua226	Ua227	Ua228	Ua229	Ua230	Ua231	Ua232	Ua233	Ua234	Ua235	Ua236	Ua237	Ua238	Ua239	Ua240	Ua241	Ua242	Ua243	Ua244	Ua245	Ua246	Ua247	Ua248	Ua249	Ua250	Ua251	Ua252	Ua253	Ua254	Ua255	Ua256	Ua257	Ua258	Ua259	Ua260	Ua261	Ua262	Ua263	Ua264	Ua265	Ua266	Ua267	Ua268	Ua269	Ua270	Ua271	Ua272	Ua273	Ua274	Ua275	Ua276	Ua277	Ua278	Ua279	Ua280	Ua281	Ua282	Ua283	Ua284	Ua285	Ua286	Ua287	Ua288	Ua289	Ua290	Ua291	Ua292	Ua293	Ua294	Ua295	Ua296	Ua297	Ua298	Ua299	Ua300	Ua301	Ua302	Ua303	Ua304	Ua305	Ua306	Ua307	Ua308	Ua309	Ua310	Ua311	Ua312	Ua313	Ua314	Ua315	Ua316	Ua317	Ua318	Ua319	Ua320	Ua321	Ua322	Ua323	Ua324	Ua325	Ua326	Ua327	Ua328	Ua329	Ua330	Ua331	Ua332	Ua333	Ua334	Ua335	Ua336	Ua337	Ua338	Ua339	Ua340	Ua341	Ua342	Ua343	Ua344	Ua345	Ua346	Ua347	Ua348	Ua349	Ua350	Ua351	Ua352	Ua353	Ua354	Ua355	Ua356	Ua357	Ua358	Ua359	Ua360	Ua361	Ua362	Ua363	Ua364	Ua365	Ua366	Ua367	Ua368	Ua369	Ua370	Ua371	Ua372	Ua373	Ua374	Ua375	Ua376	Ua377	Ua378	Ua379	Ua380	Ua381	Ua382	Ua383	Ua384	Ua385	Ua386	Ua387	Ua388	Ua389	Ua390	Ua391	Ua392	Ua393	Ua394	Ua395	Ua396	Ua397	Ua398	Ua399	Ua400	Ua401	Ua402	Ua403	Ua404	Ua405	Ua406	Ua407	Ua408	Ua409	Ua410	Ua411	Ua412	Ua413	Ua414	Ua415	Ua416	Ua417	Ua418	Ua419	Ua420	Ua421	Ua422	Ua423	Ua424	Ua425	Ua426	Ua427	Ua428	Ua429	Ua430	Ua431	Ua432	Ua433	Ua434	Ua435	Ua436	Ua437	Ua438	Ua439	Ua440	Ua441	Ua442	Ua443	Ua444	Ua445	Ua446	Ua447	Ua448	Ua449	Ua450	Ua451	Ua452	Ua453	Ua454	Ua455	Ua456	Ua457	Ua458	Ua459	Ua460	Ua461	Ua462	Ua463	Ua464	Ua465	Ua466	Ua467	Ua468	Ua469	Ua470	Ua471	Ua472	Ua473	Ua474	Ua475	Ua476	Ua477	Ua478	Ua479	Ua480	Ua481	Ua482	Ua483	Ua484	Ua485	Ua486	Ua487	Ua488	Ua489	Ua490	Ua491	Ua492	Ua493	Ua494	Ua495	Ua496	Ua497	Ua498	Ua499	Ua500	Ua501	Ua502	Ua503	Ua504	Ua505	Ua506	Ua507	Ua508	Ua509	Ua510	Ua511	Ua512	Ua513	Ua514	Ua515	Ua516	Ua517	Ua518	Ua519	Ua520	Ua521	Ua522	Ua523	Ua524	Ua525	Ua526	Ua527	Ua528	Ua529	Ua530	Ua531	Ua532	Ua533	Ua534	Ua535	Ua536	Ua537	Ua538	Ua539	Ua540	Ua541	Ua542	Ua543	Ua544	Ua545	Ua546	Ua547	Ua548	Ua549	Ua550	Ua551	Ua552	Ua553	Ua554	Ua555	Ua556	Ua557	Ua558	Ua559	Ua560	Ua561	Ua562	Ua563	Ua564	Ua565	Ua566	Ua567	Ua568	Ua569	Ua570	Ua571	Ua572	Ua573	Ua574	Ua575	Ua576	Ua577	Ua578	Ua579	Ua580	Ua581	Ua582	Ua583	Ua584	Ua585	Ua586	Ua587	Ua588	Ua589	Ua590	Ua591	Ua592	Ua593	Ua594	Ua595	Ua596	Ua597	Ua598	Ua599	Ua600	Ua601	Ua602	Ua603	Ua604	Ua605	Ua606	Ua607	Ua608	Ua609	Ua610	Ua611	Ua612	Ua613	Ua614	Ua615	Ua616	Ua617	Ua618	Ua619	Ua620	Ua621	Ua622	Ua623	Ua624	Ua625	Ua626	Ua627	Ua628	Ua629	Ua630	Ua631	Ua632	Ua633	Ua634	Ua635	Ua636	Ua637	Ua638	Ua639	Ua640	Ua641	Ua642	Ua643	Ua644	Ua645	Ua646	Ua647	Ua648	Ua649	Ua650	Ua651	Ua652	Ua653	Ua654	Ua655	Ua656	Ua657	Ua658	Ua659	Ua660	Ua661	Ua662	Ua663	Ua664	Ua665	Ua666	Ua667	Ua668	Ua669	Ua670	Ua671	Ua672	Ua673	Ua674	Ua675	Ua676	Ua677	Ua678	Ua679	Ua680	Ua681	Ua682	Ua683	Ua684	Ua685	Ua686	Ua687	Ua688	Ua689	Ua690	Ua691	Ua692	Ua693	Ua694	Ua695	Ua696	Ua697	Ua698	Ua699	Ua700	Ua701	Ua702	Ua703	Ua704	Ua705	Ua706	Ua707	Ua708	Ua709	Ua710	Ua711	Ua712	Ua713	Ua714	Ua715	Ua716	Ua717	Ua718	Ua719	Ua720	Ua721	Ua722	Ua723	Ua724	Ua725	Ua726	Ua727	Ua728	Ua729	Ua730	Ua731	Ua732	Ua733	Ua734	Ua735	Ua736	Ua737	Ua738	Ua739	Ua740	Ua741	Ua742	Ua743	Ua744	Ua745	Ua746	Ua747	Ua748	Ua749	Ua750	Ua751	Ua752	Ua753	Ua754	Ua755	Ua756	Ua757	Ua758	Ua759	Ua760	Ua761	Ua762	Ua763	Ua764	Ua765	Ua766	Ua767	Ua768	Ua769	Ua770	Ua771	Ua772	Ua773	Ua774	Ua775	Ua776	Ua777	Ua778	Ua779	Ua780	Ua781	Ua782	Ua783	Ua784	Ua785	Ua786	Ua787	Ua788	Ua789	Ua790	Ua791	Ua792	Ua793	Ua794	Ua795	Ua796	Ua797	Ua798	Ua799	Ua800	Ua801	Ua802	Ua803	Ua804	Ua805	Ua806	Ua807	Ua808	Ua809	Ua810	Ua811	Ua812	Ua813	Ua814	Ua815	Ua816	Ua817	Ua818	Ua819	Ua820	Ua821	Ua822	Ua823	Ua824	Ua825	Ua826	Ua827	Ua828	Ua829	Ua830	Ua831	Ua832	Ua833	Ua834	Ua835	Ua836	Ua837	Ua838	Ua839	Ua840	Ua841	Ua842	Ua843	Ua844	Ua845	Ua846	Ua847	Ua848	Ua849	Ua850	Ua851	Ua852	Ua853	Ua854	Ua855	Ua856	Ua857	Ua858	Ua859	Ua860	Ua861	Ua862	Ua863	Ua864	Ua865	Ua866	Ua867	Ua868	Ua869	Ua870	Ua871	Ua872	Ua873	Ua874	Ua875	Ua876	Ua877	Ua878	Ua879	Ua880	Ua881	Ua882	Ua883	Ua884	Ua885	Ua886	Ua887	Ua888	Ua889	Ua890	Ua891	Ua892	Ua893	Ua894	Ua895	Ua896	Ua897	Ua898	Ua899	Ua900	Ua901	Ua902	Ua903	Ua904	Ua905	Ua906	Ua907	Ua908	Ua909	Ua910	Ua911	Ua912	Ua913	Ua914	Ua915	Ua916	Ua917	Ua918	Ua919	Ua920	Ua921	Ua922	Ua923	Ua924	Ua925	Ua926	Ua927	Ua928	Ua929	Ua930	Ua931	Ua932	Ua933	Ua934	Ua935	Ua936	Ua937	Ua938	Ua939	Ua940	Ua941	Ua942	Ua943	Ua944	Ua945	Ua946	Ua947	Ua948	Ua949	Ua950	Ua951	Ua952	Ua953	Ua954	Ua955	Ua956	Ua957	Ua958	Ua959	Ua960	Ua961	Ua962	Ua963	Ua964	Ua965	Ua966	Ua967	Ua968	Ua969	Ua970	Ua971	Ua972	Ua973	Ua974	Ua975	Ua976	Ua977	Ua978	Ua979	Ua980	Ua981	Ua982	Ua983	Ua984	Ua985	Ua986	Ua987	Ua988	Ua989	Ua990	Ua991	Ua992	Ua993	Ua994	Ua995	Ua996	Ua997	Ua998	Ua999	Ua1000	Ua1001	Ua1002	Ua1003	Ua1004	Ua1005	Ua1006	Ua1007	Ua1008	Ua1009	Ua1010	Ua1011	Ua1012	Ua1013	Ua1014	Ua1015	Ua1016	Ua1017	Ua1018	Ua1019	Ua1020	Ua1021	Ua1022	Ua1023	Ua1024	Ua1025	Ua1026	Ua1027	Ua1028	Ua1029	Ua1030	Ua1031	Ua1032	Ua1033	Ua1034	Ua1035	Ua1036	Ua1037	Ua1038	Ua1039	Ua1040	Ua1041	Ua1042	Ua1043	Ua1044	Ua1045	Ua1046	Ua1047	Ua1048	Ua1049	Ua1050	Ua1051	Ua1052	Ua1053	Ua1054	Ua1055	Ua1056	Ua1057	Ua1058	Ua1059	Ua1060	Ua1061	Ua1062	Ua1063	Ua1064	Ua1065	Ua1066	Ua1067	Ua1068	Ua1069	Ua1070	Ua1071	Ua1072	Ua1073	Ua1074	Ua1075	Ua1076	Ua1077	Ua1078	Ua1079	Ua1080	Ua1081	Ua1082	Ua1083	Ua1084	Ua1085	Ua1086	Ua1087	Ua1088	Ua1089	Ua1090	Ua1091	Ua1092	Ua1093	Ua1094	Ua1095	Ua1096	Ua1097	Ua1098	Ua1099	Ua1100	Ua1101	Ua1102	Ua1103	Ua1104	Ua1105	Ua1106	Ua1107	Ua1108	Ua1109	Ua1110	Ua1111	Ua1112	Ua1113	Ua1114	Ua1115	Ua1116	Ua1117	Ua1118	Ua1119	Ua1120	Ua1121	Ua1122	Ua1123	Ua1124	Ua1125	Ua1126	Ua1127	Ua1128	Ua1129	Ua1130	Ua1131	Ua1132	Ua1133	Ua1134	Ua1135	Ua1136	Ua1137	Ua1138	Ua1139	Ua1140	Ua1141	Ua1142	Ua1143	Ua1144	Ua1145	Ua1146	Ua1147	Ua1148	Ua1149	Ua1150	Ua1151	Ua1152	Ua1153	Ua1154	Ua1155	Ua1156	Ua1157	Ua1158	Ua1159	Ua1160	Ua1161	Ua1162	Ua1163	Ua1164	Ua1165	Ua1166	Ua1167	Ua1168	Ua1169	Ua1170	Ua1171	Ua1172	Ua1173	Ua1174	Ua1175	Ua1176	Ua1177	Ua1178	Ua1179	Ua1180	Ua1181	Ua1182	Ua1183	Ua1184	Ua1185	Ua1186	Ua1187	Ua1188	Ua1189	Ua1190	Ua1191	Ua1192	Ua1193	Ua1194	Ua1195	Ua1196	Ua1197	Ua1198	Ua1199	Ua1200	Ua1201	Ua1202	

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARIÑAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO (dominio frecuencia)													REGISTRADO (dominio tiempo)													INCIDENTE (dominio frecuencia)													INCIDENTE (dominio tiempo)												
p1	p2	B1	B2	B3	h	h1	H	h	H	H	h	H	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln	Hm	Trn	Ln				
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	16.09	0.98	0.98	13.64	0.59	0.12	0.23	0.11	0.52	1.00	14.70	0.77	1.01	0.55	0.08	0.26	0.14	0.75	0.88	0.86	13.02	0.57	0.07	0.24	0.12	0.37	0.59	1.01	14.82	0.77	1.01	0.54	0.08	0.30	0.15	0.45																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	16.09	0.98	0.98	13.64	0.59	0.12	0.23	0.11	0.52	1.00	14.70	0.77	1.01	0.55	0.08	0.26	0.14	0.75	0.88	0.86	13.02	0.57	0.07	0.24	0.12	0.37	0.59	1.01	14.82	0.77	1.01	0.54	0.08	0.30	0.15	0.45																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	14.78	0.98	0.94	11.94	0.77	0.07	0.46	0.18	0.57	1.00	13.92	0.46	1.01	0.57	0.07	0.32	0.13	0.57	0.98	0.86	13.03	0.62	0.12	0.49	0.20	0.44	1.03	1.01	14.82	0.77	1.01	0.54	0.08	0.30	0.15	0.38																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	14.78	0.98	0.94	11.94	0.77	0.07	0.46	0.18	0.57	1.00	13.92	0.46	1.01	0.57	0.07	0.32	0.13	0.57	0.98	0.86	13.03	0.62	0.12	0.49	0.20	0.44	1.03	1.01	14.82	0.77	1.01	0.54	0.08	0.30	0.15	0.38																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	15.55	1.16	1.10	17.02	0.83	0.09	0.38	0.19	1.10	11.08	1.17	1.87	1.14	1.26	0.43	0.06	0.28	0.14	0.77	1.16	1.17	18.13	0.43	0.09	0.43	0.22	0.36	1.15	1.20	14.61	1.01	1.01	0.56	0.30	0.15	0.36																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	14.00	6.00	7.99	1.42	1.35	22.88	0.35	0.03	0.20	0.10	5.71	1.40	23.46	5.65	1.40	0.33	0.02	0.14	0.07	7.98	1.42	1.39	23.21	0.34	0.03	0.20	0.10	5.72	1.40	23.46	5.65	1.44	0.33	0.02	0.14	0.07	0.29																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	14.00	6.00	7.99	1.42	1.35	22.88	0.35	0.03	0.20	0.10	5.71	1.40	23.46	5.65	1.40	0.33	0.02	0.14	0.07	7.98	1.42	1.39	23.21	0.34	0.03	0.20	0.10	5.72	1.40	23.46	5.65	1.44	0.33	0.02	0.14	0.07	0.29																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	14.00	6.00	7.99	1.42	1.35	22.88	0.35	0.03	0.20	0.10	5.71	1.40	23.46	5.65	1.40	0.33	0.02	0.14	0.07	7.98	1.42	1.39	23.21	0.34	0.03	0.20	0.10	5.72	1.40	23.46	5.65	1.44	0.33	0.02	0.14	0.07	0.29																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	14.35	1.60	1.45	16.20	0.32	0.06	0.38	0.10	10.54	1.61	28.53	10.40	1.58	0.28	0.04	0.26	0.13	1.60	1.54	17.07	0.30	0.06	0.39	0.19	0.23	1.60	1.62	28.57	10.77	1.68	0.28	0.04	0.26	0.13	0.21																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	16.00	8.01	1.83	1.78	31.64	0.25	0.03	0.20	0.10	5.74	1.79	28.46	5.68	1.81	0.25	0.02	0.14	0.07	8.60	1.81	1.73	30.64	0.26	0.03	0.22	0.11	0.18	5.85	1.82	33.19	5.74	1.78	0.24	0.02	0.15	0.07	0.17																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	16.00	8.01	1.83	1.78	31.64	0.25	0.03	0.20	0.10	5.74	1.79	28.46	5.68	1.81	0.25	0.02	0.14	0.07	8.60	1.81	1.73	30.64	0.26	0.03	0.22	0.11	0.18	5.85	1.82	33.19	5.74	1.78	0.24	0.02	0.15	0.07	0.17																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	16.00	8.02	1.83	1.78	33.08	0.24	0.02	0.21	0.10	5.74	1.78	28.94	5.71	1.72	0.26	0.02	0.14	0.07	8.60	1.81	1.73	30.64	0.26	0.03	0.22	0.11	0.18	5.85	1.82	33.19	5.74	1.78	0.24	0.02	0.15	0.07	0.17																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	16.00	8.02	1.83	1.78	33.08	0.24	0.02	0.21	0.10	5.74	1.78	28.94	5.71	1.72	0.26	0.02	0.14	0.07	8.60	1.81	1.73	30.64	0.26	0.03	0.22	0.11	0.18	5.85	1.82	33.19	5.74	1.78	0.24	0.02	0.15	0.07	0.17																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	12.00	15.00	1.82	1.73	16.99	0.24	0.02	0.21	0.10	11.25	1.81	30.79	10.91	1.99	0.22	0.03	0.28	0.14	1.74	1.23	1.95	35.73	0.22	0.04	0.27	0.18	0.30	10.02	0.22	37.37	9.76	2.00	0.21	0.03	0.25	0.13	0.29																						
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0	20.0	40.0	1.00	22.00	6.90	2.24	2.19	38.73	0.21	0.02	0.17	0.09	5.08	2.30	33.32	4.84	2.35	0.18	0.01	0.13	0.06	7.4	2.32	41.07	0.19	0.02	0.18	0.09	0.14	4.83	2.29	43.46	4.76	2.24	0.19	0.01	0.12	0.06	0.15																							
0.30	0.20	60.0																																																														

Anexo D.2. Oleaje irregular

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO										INCIDENTE (LASA)									
p1	p2	p3	B1	B2	B3	h	h	h	h _s	Hmo	Tp	h	Hmo	Tp	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo	Tp	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR					
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(cm)	(cm)	(s)	(cm)					(cm)	(s)	(cm)				(cm)						
0.130			20.00			40.00	1.00	4.00	5.20	1.00	0.86	112.47	0.18	0.05	0.13	0.26	0.05	0.13	0.26	4.99	0.99	0.92	126.89	0.89	0.04	107.91	0.04	0.33				
0.130			20.00			40.00	1.00	8.00	8.69	1.03	0.91	125.09	0.16	0.07	0.22	0.43	0.05	0.22	0.43	8.06	1.02	0.95	135.38	0.93	0.06	116.06	0.06	0.38				
0.130			20.00			32.00	1.00	4.00	5.42	1.01	0.85	108.14	0.18	0.05	0.17	0.27	0.05	0.17	0.27	5.12	0.99	0.92	122.10	0.89	0.04	102.03	0.05	0.37				
0.130			20.00			32.00	1.00	8.00	9.10	1.03	0.93	124.31	0.16	0.07	0.28	0.45	0.05	0.28	0.45	8.50	1.03	0.96	131.62	0.95	0.06	116.20	0.07	0.40				
0.130			40.00			40.00	1.00	4.00	5.15	0.99	0.86	113.49	0.35	0.05	0.13	0.13	0.04	0.13	0.13	4.90	0.98	0.92	126.06	0.91	0.04	107.88	0.04	0.44				
0.130			40.00			40.00	1.50	8.00	8.51	1.51	1.22	198.77	0.20	0.04	0.21	0.21	0.04	0.21	0.21	8.00	1.42	1.31	219.23	0.91	0.04	186.89	0.04	0.40				
0.130			40.00			40.00	2.50	15.00	13.39	2.24	1.75	315.55	0.13	0.04	0.33	0.33	0.04	0.33	0.33	13.32	2.56	1.97	363.08	0.87	0.04	313.86	0.04	0.50				
0.130			40.00			32.00	1.00	4.00	4.98	0.93	0.86	109.37	0.37	0.05	0.16	0.16	0.05	0.16	0.16	4.52	0.98	0.92	121.99	0.91	0.04	99.31	0.04	0.48				
0.130			40.00			32.00	1.50	8.00	9.27	1.51	1.29	199.03	0.20	0.05	0.29	0.29	0.05	0.29	0.29	8.56	1.60	1.33	207.31	0.97	0.04	183.79	0.04	0.45				
0.130			40.00			32.00	2.50	15.00	13.33	2.28	1.65	268.67	0.15	0.05	0.42	0.42	0.05	0.42	0.42	13.08	2.56	1.87	311.57	0.87	0.04	263.69	0.05	0.52				
0.130			60.00			40.00	1.50	4.00	5.66	1.52	1.21	196.76	0.30	0.03	0.14	0.14	0.03	0.14	0.14	5.42	1.60	1.42	243.44	0.81	0.02	188.14	0.03	0.27				
0.130			60.00			40.00	1.50	8.00	10.24	1.52	1.24	203.88	0.29	0.05	0.26	0.26	0.05	0.26	0.26	9.55	1.60	1.41	241.71	0.85	0.04	190.25	0.05	0.36				
0.130			60.00			40.00	2.50	4.00	5.04	2.40	1.94	356.84	0.17	0.01	0.13	0.13	0.01	0.13	0.13	4.90	2.13	2.15	401.24	0.89	0.01	347.27	0.01	0.34				
0.130			60.00			40.00	2.50	8.00	9.67	2.40	1.87	340.82	0.18	0.03	0.24	0.24	0.03	0.24	0.24	9.21	2.13	2.06	382.97	0.90	0.02	324.60	0.03	0.38				
0.130			60.00			32.00	1.50	4.00	5.85	1.60	1.22	185.53	0.32	0.03	0.18	0.18	0.03	0.18	0.18	5.50	1.60	1.32	204.49	0.91	0.03	174.27	0.03	0.36				
0.130			60.00			32.00	1.50	8.00	10.64	1.60	1.26	193.59	0.31	0.05	0.33	0.33	0.05	0.33	0.33	9.82	1.60	1.33	206.50	0.95	0.05	178.54	0.05	0.40				
0.130			60.00			32.00	2.50	4.00	5.34	2.13	1.85	307.61	0.20	0.02	0.17	0.17	0.02	0.17	0.17	5.13	2.13	2.03	341.06	0.91	0.02	295.89	0.02	0.34				
0.130			60.00			32.00	2.50	8.00	10.17	2.40	1.75	287.14	0.21	0.04	0.32	0.32	0.04	0.32	0.32	9.51	2.13	1.88	313.25	0.92	0.03	288.53	0.03	0.40				
0.260			20.00			40.00	1.00	4.00	5.21	1.03	0.86	113.94	0.18	0.05	0.13	0.13	0.05	0.13	0.13	5.05	1.07	0.96	136.13	0.84	0.04	110.43	0.04	0.31				
0.260			20.00			40.00	1.00	8.00	8.32	1.07	0.91	124.94	0.16	0.07	0.21	0.21	0.07	0.21	0.21	8.22	1.07	0.98	141.01	0.89	0.06	123.32	0.07	0.27				
0.260			20.00			32.00	1.00	4.00	5.26	1.03	0.85	107.08	0.19	0.05	0.16	0.16	0.05	0.16	0.16	5.07	1.07	0.95	129.51	0.83	0.04	103.18	0.05	0.29				
0.260			20.00			32.00	1.00	8.00	8.31	1.07	0.90	119.08	0.17	0.07	0.26	0.26	0.07	0.26	0.26	8.29	1.07	0.98	135.39	0.89	0.06	118.82	0.07	0.26				
0.260			20.00			32.00	2.50	4.00	6.67	2.67	2.03	341.37	0.06	0.02	0.21	0.21	0.02	0.21	0.21	5.77	2.13	2.12	357.85	0.96	0.02	295.52	0.02	0.71				
0.260			20.00			32.00	2.50	8.00	11.21	2.67	1.96	327.60	0.06	0.03	0.35	0.35	0.03	0.35	0.35	9.92	2.13	2.01	337.25	0.98	0.03	289.94	0.03	0.63				
0.260			40.00			40.00	1.00	8.00	8.44	1.07	0.89	119.84	0.33	0.07	0.21	0.21	0.07	0.21	0.21	8.26	1.07	0.95	134.60	0.90	0.06	117.32	0.07	0.28				
0.260			40.00			40.00	1.50	4.00	5.20	1.60	1.24	197.65	0.20	0.04	0.13	0.13	0.04	0.13	0.13	5.18	1.60	1.32	220.65	0.90	0.02	196.70	0.05	0.21				
0.260			40.00			40.00	1.50	8.00	9.10	1.60	1.24	203.51	0.20	0.04	0.23	0.23	0.04	0.23	0.23	9.23	1.60	1.36	229.77	0.89	0.02	206.48	0.05	0.21				
0.260			40.00			40.00	2.00	8.00	10.37	2.13	1.68	300.78	0.13	0.03	0.26	0.26	0.03	0.26	0.26	9.83	2.13	1.76	318.95	0.95	0.03	285.03	0.03	0.36				
0.260			40.00			36.00	1.50	4.00	5.26	1.60	1.24	196.14	0.20	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.15	5.19	1.60	1.28	205.51	0.96	0.03	193.78	0.03	0.24				
0.260			40.00			36.00	1.50	8.00	9.28	1.60	1.23	193.59	0.21	0.03	0.26	0.26	0.03	0.26	0.26	9.22	1.60	1.27	203.48	0.96	0.05	192.29	0.05	0.21				
0.260			40.00			32.00	1.50	4.00	5.13	1.60	1.21	182.33	0.22	0.03	0.16	0.16	0.03	0.16	0.16	5.20	1.60	1.32	205.20	0.90	0.03	184.83	0.03	0.21				
0.260			40.00			32.00	1.50	8.00	9.00	1.60	1.22	184.92	0.22	0.05	0.28	0.28	0.05	0.28	0.28	9.17	1.60	1.35	210.81	0.88	0.04	188.38	0.05	0.19				
0.260			40.00			40.00	1.00	4.00	6.10	0.92	0.90	122.74	0.33	0.05	0.15	0.15	0.05	0.15	0.15	4.98	1.00	1.09	167.28	0.74	0.03	100.20	0.04	0.83				
0.260			40.00			40.00	1.00	8.00	8.97	0.97	0.94	130.90	0.31	0.07	0.22	0.22	0.07	0.22	0.22	4.35	0.92	0.99	144.33	0.92	0.03	63.43	0.03	0.90				
0.260			40.00			40.00	1.00	12.00	10.15	1.09	0.96	137.53	0.29	0.07	0.25	0.25	0.07	0.25	0.25	12.04	1.03	0.96	137.01	0.91	0.09	163.15	0.09	0.43				
0.260			40.00			40.00	1.00	16.00	11.02	1.10	0.98	141.89	0.28	0.08	0.28	0.28	0.08	0.28	0.28	13.22	1.03	1.00	145.54	0.98	0.09	170.16	0.09	0.40				

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO										INCIDENTE (LASA)									
p1	p2	p3	B1	B2	B3	h	h	h _s	Hmo	TP	T01	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo	TP	T01	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR							
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)					(cm)	(s)	(s)	(cm)												
0.260			40.00	2.00	4.00	6.10	0.92	0.90	122.74	0.33	0.05	0.15	0.21	0.15	0.21	5.12	2.13	1.74	314.89	0.39	0.02	102.94	0.04	0.40								
0.260			40.00	2.00	8.00	8.29	2.13	1.50	261.65	0.15	0.03	0.21	0.15	0.21	0.15	9.06	2.13	1.67	297.98	0.88	0.03	286.05	0.03	0.30								
0.260			40.00	3.00	4.00	5.15	3.15	2.28	428.28	0.09	0.01	0.13	0.13	0.13	0.13	4.67	3.28	2.42	457.47	0.94	0.01	387.83	0.01	0.44								
0.260			40.00	3.00	8.00	9.30	3.21	1.89	346.06	0.12	0.03	0.23	0.23	0.23	0.23	9.07	3.21	2.36	445.85	0.78	0.02	337.33	0.03	0.37								
0.260			60.00	60.00	4.00	5.26	1.52	1.20	192.51	0.31	0.03	0.09	0.09	0.09	0.09	5.26	1.60	1.31	218.71	0.89	0.02	192.45	0.03	0.31								
0.260			60.00	1.50	8.00	9.00	1.60	1.21	195.32	0.31	0.05	0.23	0.15	0.23	0.15	9.11	1.60	1.32	221.29	0.89	0.04	197.68	0.05	0.26								
0.260			60.00	2.50	4.00	5.00	2.40	2.01	371.52	0.16	0.01	0.13	0.08	0.13	0.08	5.11	2.13	2.24	420.64	0.89	0.01	379.86	0.01	0.47								
0.260			60.00	2.50	8.00	9.04	2.40	1.93	355.62	0.17	0.03	0.23	0.15	0.23	0.15	8.92	2.13	2.08	337.33	0.92	0.02	350.60	0.02	0.37								
0.260			60.00	1.50	4.00	5.52	1.60	1.19	179.26	0.33	0.03	0.17	0.09	0.17	0.09	5.44	1.60	1.30	201.38	0.90	0.03	176.85	0.03	0.31								
0.260			60.00	1.50	8.00	9.64	1.60	1.20	181.82	0.33	0.05	0.30	0.16	0.30	0.16	9.62	1.60	1.36	212.63	0.86	0.05	181.51	0.05	0.28								
0.260			60.00	2.50	4.00	5.57	2.13	1.89	314.35	0.19	0.02	0.17	0.09	0.17	0.09	5.22	2.13	2.05	345.46	0.92	0.02	294.87	0.02	0.34								
0.260			60.00	2.50	8.00	10.23	2.13	1.76	289.37	0.21	0.04	0.32	0.17	0.32	0.17	9.67	2.13	2.01	336.69	0.87	0.03	273.59	0.03	0.35								
0.260			40.00	1.00	4.00	4.97	0.94	0.85	110.66	0.54	0.04	0.12	0.08	0.12	0.08	4.62	0.96	0.94	131.33	0.85	0.04	102.91	0.04	0.47								
0.260			40.00	1.00	8.00	7.62	0.99	0.90	123.08	0.49	0.06	0.19	0.13	0.19	0.13	7.48	0.96	0.96	135.69	0.92	0.06	120.87	0.06	0.35								
0.260			40.00	2.00	4.00	4.68	2.09	1.66	297.04	0.20	0.02	0.12	0.08	0.12	0.08	4.58	2.13	1.87	342.86	0.87	0.01	290.62	0.02	0.47								
0.260			40.00	2.00	8.00	8.69	2.08	1.62	287.04	0.21	0.03	0.22	0.14	0.22	0.14	8.23	2.13	1.88	343.49	0.84	0.02	271.99	0.03	0.43								
0.260			40.00	3.00	4.00	6.11	3.02	2.32	436.45	0.14	0.01	0.15	0.10	0.15	0.10	5.34	3.28	2.63	500.26	0.88	0.01	381.05	0.01	0.67								
0.260			40.00	3.00	8.00	10.28	2.94	1.99	367.89	0.16	0.03	0.26	0.17	0.26	0.17	9.18	3.28	2.35	443.02	0.84	0.02	328.41	0.02	0.56								
0.350			40.00	2.00	4.00	4.89	2.09	1.55	273.50	0.15	0.02	0.12	0.12	0.12	0.12	4.81	1.98	1.70	304.63	0.90	0.02	269.16	0.02	0.40								
0.350			40.00	2.00	8.00	8.78	2.09	1.47	253.97	0.16	0.03	0.22	0.22	0.22	0.22	8.66	2.13	1.81	329.32	0.78	0.03	250.61	0.03	0.45								
0.350			40.00	3.00	4.00	5.73	3.15	2.39	449.48	0.09	0.01	0.14	0.14	0.14	0.14	5.20	3.28	2.52	476.97	0.95	0.01	407.55	0.01	0.55								
0.350			40.00	3.00	8.00	9.66	3.09	2.54	481.64	0.08	0.02	0.24	0.24	0.24	0.24	10.83	3.20	2.73	520.54	0.93	0.02	539.96	0.02	0.55								
0.350			60.00	60.00	4.00	5.29	0.97	0.86	112.20	0.53	0.05	0.13	0.09	0.13	0.09	4.94	0.92	0.91	125.01	0.91	0.04	104.78	0.04	0.47								
0.350			40.00	1.00	8.00	8.11	0.97	0.91	125.52	0.48	0.06	0.20	0.14	0.20	0.14	9.09	0.96	0.94	133.12	0.95	0.07	140.82	0.07	0.28								
0.350			40.00	2.00	4.00	5.09	2.09	1.60	282.72	0.21	0.02	0.13	0.08	0.13	0.08	4.87	2.13	1.87	342.13	0.83	0.01	270.74	0.02	0.60								
0.350			40.00	2.00	8.00	8.97	2.09	1.53	267.78	0.22	0.03	0.22	0.15	0.22	0.15	8.54	2.13	1.92	351.37	0.77	0.02	355.10	0.03	0.57								
0.350			40.00	3.00	4.00	6.36	3.06	2.34	439.10	0.14	0.01	0.16	0.11	0.16	0.11	5.53	3.28	2.70	514.29	0.86	0.01	382.07	0.01	0.59								
0.350			40.00	3.00	8.00	10.50	2.97	2.04	376.84	0.16	0.03	0.26	0.18	0.26	0.18	9.22	3.28	2.35	442.82	0.86	0.02	330.85	0.02	0.62								
0.130	0.05		60.00	20.00		5.44	1.03	0.92	126.43	0.63	0.04	0.14	0.07	0.14	0.07	5.03	1.07	0.95	135.05	0.95	0.04	116.86	0.04	0.48								
0.130	0.05		60.00	20.00		9.03	1.07	0.97	139.13	0.58	0.06	0.23	0.11	0.23	0.11	8.19	1.07	0.98	141.92	0.99	0.06	126.15	0.06	0.49								
0.130	0.05		60.00	20.00		4.59	2.13	1.52	265.29	0.30	0.02	0.11	0.06	0.11	0.06	4.77	2.13	1.72	310.27	0.86	0.02	275.96	0.02	0.35								
0.130	0.05		60.00	20.00		8.39	2.13	1.48	257.75	0.31	0.03	0.21	0.10	0.21	0.10	8.74	2.13	1.69	302.12	0.86	0.02	288.70	0.03	0.35								
0.130	0.05		60.00	20.00		5.19	0.99	0.95	127.94	0.63	0.04	0.16	0.06	0.16	0.06	4.66	1.07	0.96	131.47	0.99	0.04	114.91	0.04	0.55								
0.130	0.05		60.00	20.00		8.60	1.03	0.98	134.49	0.59	0.06	0.27	0.11	0.27	0.11	7.80	1.07	0.99	138.36	0.98	0.06	121.95	0.06	0.53								
0.130	0.05		60.00	20.00		9.08	2.00	1.47	233.88	0.34	0.04	0.28	0.11	0.28	0.11	9.29	2.13	1.68	273.99	0.86	0.03	239.35	0.04	0.39								

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO											INCIDENTE (LASA)										
p1	p2	p3	B1 (cm)	B2 (cm)	B3 (cm)	h (cm)	h (cm)	h _s (cm)	h _s (cm)	Hmo (cm)	Tp (s)	Tp (s)	L01 (cm)	L01 (cm)	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo (cm)	Tp (s)	Tp (s)	L01 (cm)	L01 (cm)	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR						
0.130	0.05		60.00	20.00		32.00	2.00	8.00	8.75	2.13	1.47	233.62	0.34	0.04	0.27	0.11	0.91	2.13	1.67	272.27	0.86	0.03	237.82	0.04	0.39									
0.130	0.05		40.00	40.00		40.00	1.00	4.00	5.16	1.00	0.87	115.39	0.69	0.04	0.13	0.06	4.93	1.02	0.93	129.82	0.90	0.04	110.30	0.04	0.36									
0.130	0.05		40.00	40.00		40.00	1.00	8.00	8.49	1.05	0.92	127.99	0.63	0.07	0.21	0.11	8.05	1.01	0.96	137.81	0.94	0.06	121.36	0.06	0.39									
0.130	0.05		40.00	40.00		40.00	2.00	4.00	4.64	2.01	1.55	272.21	0.29	0.02	0.12	0.06	4.91	1.97	1.75	315.47	0.87	0.02	288.17	0.02	0.31									
0.130	0.05		40.00	40.00		40.00	2.00	8.00	8.37	2.01	1.52	265.15	0.30	0.03	0.21	0.10	8.95	1.97	1.71	308.58	0.87	0.03	283.34	0.03	0.40									
0.130	0.05		40.00	40.00		32.00	1.00	4.00	5.22	0.94	0.86	109.52	0.73	0.05	0.16	0.07	4.92	0.98	0.92	123.49	0.90	0.04	103.20	0.04	0.39									
0.130	0.05		40.00	40.00		32.00	1.00	8.00	8.14	1.04	0.93	123.93	0.65	0.07	0.25	0.10	7.60	1.03	0.97	133.69	0.94	0.06	115.61	0.06	0.42									
0.130	0.05		40.00	40.00		32.00	2.00	4.00	8.96	1.93	1.49	239.08	0.33	0.04	0.28	0.11	9.30	1.97	1.69	277.75	0.87	0.03	247.90	0.04	0.42									
0.130	0.05		40.00	40.00		32.00	2.00	8.00	8.59	1.93	1.49	238.29	0.34	0.04	0.27	0.11	8.92	1.97	1.70	277.84	0.86	0.03	247.43	0.04	0.41									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	1.00	4.00	4.63	1.09	0.86	112.27	0.71	0.04	0.12	0.06	4.66	0.96	0.94	132.72	0.86	0.04	112.96	0.04	0.38									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	1.00	8.00	7.37	1.06	0.92	128.19	0.62	0.06	0.18	0.09	7.93	1.01	0.97	138.14	0.94	0.06	138.01	0.06	0.24									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	2.00	4.00	4.62	2.06	1.60	283.82	0.28	0.02	0.12	0.06	4.73	2.13	1.82	330.95	0.86	0.01	290.61	0.02	0.23									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	2.00	8.00	8.56	2.13	1.54	270.55	0.30	0.03	0.21	0.11	8.64	2.13	1.77	320.92	0.85	0.03	273.04	0.03	0.19									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	3.00	4.00	4.98	3.15	2.34	441.17	0.18	0.01	0.12	0.06	4.71	3.28	2.80	533.87	0.83	0.01	417.62	0.01	0.36									
0.350	0.26		40.00	40.00		40.00	3.00	8.00	8.79	3.28	2.02	373.91	0.21	0.02	0.22	0.11	8.68	2.84	2.38	450.32	0.84	0.02	369.60	0.02	0.33									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	40.00	4.00	4.00	5.07	0.97	0.89	121.05	0.66	0.04	0.13	0.06	5.02	0.98	0.94	131.01	0.94	0.04	119.68	0.04	0.28									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	40.00	1.00	8.00	8.01	1.03	0.95	133.84	0.60	0.06	0.20	0.10	8.02	1.01	0.98	140.73	0.96	0.06	134.10	0.06	0.25									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	40.00	2.00	4.00	4.41	2.13	1.63	289.23	0.28	0.02	0.11	0.06	4.49	2.13	1.76	319.29	0.91	0.01	294.82	0.02	0.15									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	40.00	2.00	8.00	8.01	2.13	1.55	272.85	0.29	0.03	0.20	0.10	8.32	2.13	1.71	307.48	0.89	0.03	283.45	0.03	0.19									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	32.00	1.00	4.00	4.89	0.99	0.90	117.40	0.68	0.04	0.15	0.06	4.78	0.98	0.94	127.41	0.93	0.04	114.75	0.04	0.31									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	32.00	1.00	8.00	8.04	1.05	0.96	130.63	0.61	0.06	0.25	0.10	8.02	1.01	0.99	136.41	0.97	0.06	130.29	0.06	0.28									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.71	2.13	1.51	242.34	0.33	0.04	0.27	0.11	8.96	2.13	1.70	278.59	0.88	0.03	249.42	0.04	0.22									
0.260	0.13	0.05	40.00	20.00	20.00	32.00	2.00	8.00	8.37	2.13	1.52	243.21	0.33	0.03	0.26	0.10	8.61	2.13	1.70	278.32	0.88	0.03	250.18	0.04	0.22									

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS											REGISTRADO											INCIDENTE (LASA)										
p1	p2	p3	B1 (cm)	B2 (cm)	B3 (cm)	h (cm)	h (cm)	h _s (cm)	Hmo (cm)	Tp (s)	T01 (s)	L01 (cm)	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo (cm)	Tp (s)	T01 (s)	L01 (cm)	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR							
0.200			20.00			40.00	1.50	8.00	9.06	1.51	1.32	222.17	0.09	0.04	0.23	0.45	8.42	1.60	1.36	229.48	0.09	0.04	0.21	0.42	0.52							
0.200			20.00			40.00	2.50	12.00	15.76	2.61	1.90	348.85	0.06	0.05	0.39	0.79	12.85	2.56	1.91	349.76	0.06	0.04	0.32	0.64	0.70							
0.200			20.00			32.00	1.50	8.00	9.01	1.61	1.27	194.01	0.10	0.05	0.28	0.45	8.54	1.60	1.35	210.32	0.10	0.04	0.27	0.43	0.46							
0.200			20.00			32.00	2.50	12.00	13.67	2.61	1.79	295.70	0.07	0.05	0.43	0.68	11.23	2.56	1.81	299.63	0.07	0.04	0.35	0.56	0.64							
0.200			20.00			32.00	1.00	4.00	5.37	0.92	0.86	110.18	0.36	0.05	0.17	0.13	5.12	0.98	0.92	122.37	0.33	0.04	0.16	0.13	0.39							
0.200			20.00			40.00	1.00	4.00	4.92	0.97	0.86	112.95	0.35	0.04	0.12	0.12	4.55	0.98	0.96	135.77	0.29	0.03	0.11	0.11	0.43							
0.200			40.00			40.00	1.50	8.00	8.42	1.56	1.21	196.55	0.20	0.04	0.21	0.21	8.20	1.42	1.41	241.94	0.17	0.03	0.21	0.21	0.28							
0.200			40.00			40.00	2.50	15.00	13.17	2.28	1.75	316.77	0.13	0.04	0.33	0.33	13.45	2.56	1.89	346.22	0.12	0.04	0.34	0.34	0.41							
0.200			40.00			32.00	1.50	8.00	8.77	1.56	1.22	184.59	0.22	0.05	0.27	0.27	8.60	1.60	1.33	206.01	0.19	0.04	0.27	0.21	0.30							
0.200			40.00			32.00	2.50	15.00	13.31	1.96	1.64	266.88	0.15	0.05	0.42	0.33	13.47	2.56	1.79	295.67	0.14	0.05	0.42	0.34	0.40							
0.200			60.00			40.00	1.00	4.00	6.14	0.99	0.90	122.82	0.49	0.05	0.15	0.10	5.42	0.98	0.92	128.12	0.47	0.04	0.14	0.09	0.60							
0.200			60.00			40.00	1.50	8.00	8.41	1.51	1.20	192.75	0.31	0.04	0.21	0.14	8.21	1.42	1.32	221.19	0.27	0.04	0.21	0.14	0.34							
0.200			60.00			40.00	2.50	15.00	12.83	2.24	1.71	308.20	0.19	0.04	0.32	0.21	13.16	2.56	1.86	339.36	0.18	0.04	0.33	0.22	0.34							
0.200			60.00			32.00	1.00	4.00	6.17	1.01	0.90	117.56	0.51	0.05	0.19	0.10	5.46	0.98	0.92	123.39	0.49	0.04	0.17	0.09	0.63							
0.200			60.00			32.00	1.50	8.00	8.87	1.51	1.20	179.91	0.33	0.05	0.28	0.15	8.64	1.60	1.30	200.20	0.30	0.04	0.27	0.14	0.36							
0.200			60.00			32.00	1.00	5.00	12.76	2.24	1.60	258.80	0.23	0.05	0.40	0.21	12.91	2.56	1.71	280.96	0.21	0.05	0.40	0.22	0.36							
0.300			20.00			40.00	1.00	4.00	5.08	0.99	0.87	114.77	0.17	0.04	0.13	0.25	4.89	1.01	0.93	128.71	0.16	0.04	0.12	0.24	0.35							
0.300			20.00			40.00	1.00	8.00	8.04	1.08	0.81	125.66	0.16	0.06	0.20	0.40	7.81	1.01	0.96	136.05	0.15	0.06	0.20	0.39	0.31							
0.300			20.00			32.00	1.00	4.00	5.10	1.03	0.84	105.62	0.19	0.05	0.16	0.25	4.95	1.00	0.93	124.34	0.16	0.04	0.15	0.25	0.29							
0.300			20.00			32.00	1.00	8.00	8.00	1.00	0.90	118.12	0.17	0.07	0.25	0.40	7.86	1.02	0.96	131.72	0.15	0.06	0.25	0.39	0.26							
0.300			40.00			40.00	1.00	4.00	5.34	0.95	0.85	109.80	0.36	0.05	0.13	0.13	4.34	0.99	0.92	128.28	0.31	0.03	0.11	0.11	0.42							
0.300			40.00			40.00	1.00	8.00	8.02	1.03	0.88	118.29	0.34	0.07	0.20	0.20	6.89	1.07	0.96	136.26	0.29	0.05	0.17	0.17	0.33							
0.300			40.00			40.00	2.00	4.00	6.11	2.13	1.74	313.03	0.13	0.02	0.15	0.15	4.75	2.13	1.78	322.42	0.12	0.01	0.12	0.12	0.48							
0.300			40.00			40.00	1.00	8.00	10.14	2.13	1.69	303.29	0.13	0.03	0.25	0.25	8.19	2.13	1.74	314.89	0.13	0.03	0.20	0.20	0.41							
0.300			40.00			32.00	1.00	4.00	5.42	0.98	0.85	106.70	0.37	0.05	0.17	0.14	4.87	0.98	0.95	128.57	0.31	0.04	0.15	0.12	0.37							
0.300			40.00			32.00	1.00	8.00	8.30	0.98	0.89	120.96	0.33	0.07	0.26	0.21	7.92	0.98	0.98	144.86	0.28	0.05	0.25	0.20	0.27							
0.300			40.00			32.00	2.00	4.00	9.69	2.56	1.44	229.45	0.17	0.04	0.30	0.24	9.16	2.56	1.61	262.41	0.15	0.03	0.29	0.23	0.28							
0.300			40.00			32.00	2.00	8.00	9.07	2.56	1.46	231.94	0.17	0.04	0.28	0.23	8.60	2.56	1.63	265.99	0.15	0.03	0.27	0.21	0.28							
0.300			60.00			40.00	1.00	4.00	6.43	0.99	0.90	122.68	0.49	0.05	0.16	0.11	5.54	1.03	0.94	132.16	0.45	0.04	0.14	0.09	0.66							
0.300			60.00			40.00	1.00	8.00	8.98	1.03	0.93	129.81	0.46	0.07	0.22	0.15	7.97	1.07	0.97	138.70	0.43	0.06	0.20	0.13	0.61							
0.300			60.00			40.00	1.50	8.00	9.27	1.60	1.19	190.47	0.32	0.05	0.23	0.15	9.21	1.60	1.31	218.20	0.27	0.04	0.23	0.15	0.29							
0.300			60.00			40.00	2.00	4.00	4.96	1.60	1.60	282.84	0.21	0.02	0.19	0.08	4.75	1.60	1.71	307.91	0.19	0.02	0.12	0.08	0.30							
0.300			60.00			32.00	1.00	4.00	6.22	0.99	0.90	118.83	0.50	0.05	0.12	0.10	5.35	1.07	0.95	128.73	0.47	0.04	0.17	0.09	0.67							
0.300			60.00			32.00	1.00	8.00	8.77	1.03	0.93	124.72	0.48	0.07	0.27	0.15	7.76	1.07	0.98	135.34	0.44	0.06	0.24	0.13	0.59							
0.300			60.00			32.00	2.00	4.00	8.89	1.60	1.49	238.52	0.25	0.04	0.28	0.15	9.00	1.60	1.62	262.81	0.23	0.03	0.28	0.15	0.25							
0.300			60.00			32.00	2.00	8.00	8.75	1.60	1.50	239.98	0.25	0.04	0.27	0.15	8.83	1.60	1.62	263.44	0.23	0.03	0.28	0.15	0.27							
0.400			40.00			40.00	1.00	4.00	4.89	0.95	0.89	118.97	0.34	0.04	0.12	0.12	4.74	0.91	0.93	128.41	0.31	0.04	0.12	0.12	0.35							

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO													INCIDENTE (LASA)												
p1	p2	p3	B1	B2	B3	h	h	h _s	Hmo	Tp	T01	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo	Tp	T01	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR													
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)												
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	8.00	7.55	1.03	0.93	129.37	0.31	0.06	0.19	0.19	7.55	1.07	0.97	139.38	0.29	0.05	0.19	0.19	0.27													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	4.00	5.49	2.13	1.70	304.68	0.13	0.02	0.14	0.14	4.93	2.13	1.78	321.99	0.12	0.02	0.12	0.12	0.37													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	8.00	9.63	2.13	1.64	292.02	0.14	0.03	0.24	0.24	8.96	2.13	1.75	316.42	0.13	0.03	0.22	0.22	0.33													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	4.00	4.91	0.99	0.89	116.31	0.34	0.04	0.15	0.12	4.68	0.99	0.93	123.85	0.32	0.04	0.15	0.12	0.38													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	8.00	7.65	0.99	0.93	124.18	0.32	0.06	0.24	0.19	7.55	1.07	0.96	131.86	0.30	0.06	0.24	0.19	0.32													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	4.00	9.53	2.13	1.57	253.99	0.16	0.04	0.30	0.24	9.01	2.13	1.70	278.94	0.14	0.03	0.28	0.23	0.30													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	8.00	9.35	2.13	1.59	257.15	0.16	0.04	0.29	0.23	8.81	2.13	1.72	283.39	0.14	0.03	0.28	0.22	0.30													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	4.00	5.81	0.95	0.93	129.01	0.47	0.05	0.15	0.10	5.13	0.99	0.96	135.65	0.44	0.04	0.13	0.09	0.63													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	8.00	8.36	0.99	0.96	137.09	0.44	0.06	0.21	0.14	7.66	1.07	0.98	142.73	0.42	0.05	0.19	0.13	0.55													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	4.00	5.12	2.13	1.56	273.97	0.22	0.02	0.13	0.09	4.90	2.13	1.78	323.42	0.19	0.02	0.12	0.08	0.33													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	8.00	8.98	2.13	1.50	261.02	0.23	0.03	0.22	0.15	9.01	2.13	1.66	297.55	0.20	0.03	0.23	0.15	0.24													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	4.00	5.66	0.95	0.93	125.37	0.48	0.05	0.18	0.09	4.94	1.07	0.95	129.75	0.46	0.04	0.15	0.08	0.64													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	8.00	8.15	1.03	0.87	132.59	0.45	0.06	0.25	0.14	7.34	1.07	0.98	136.18	0.44	0.05	0.23	0.12	0.59													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	4.00	9.36	2.13	1.48	235.88	0.25	0.04	0.29	0.16	9.18	2.13	1.65	269.28	0.22	0.03	0.29	0.15	0.27													
0.400			40.00	40.00	40.00	40.00	2.00	8.00	9.18	2.13	1.48	236.41	0.25	0.04	0.29	0.15	9.01	2.13	1.66	270.54	0.22	0.03	0.28	0.15	0.27													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	9.13	1.48	1.24	202.55	0.20	0.05	0.23	0.23	8.38	1.42	1.34	225.75	0.18	0.04	0.21	0.21	0.49													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	14.90	2.09	1.84	335.32	0.12	0.04	0.37	0.37	13.72	2.56	1.79	324.73	0.12	0.04	0.34	0.34	0.60													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	9.25	1.51	1.20	181.52	0.22	0.05	0.29	0.29	8.78	1.60	1.33	207.18	0.19	0.04	0.27	0.22	0.41													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	13.10	2.30	1.75	287.90	0.14	0.05	0.41	0.33	12.37	2.56	1.77	291.18	0.14	0.04	0.39	0.31	0.55													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	9.01	1.56	1.21	196.45	0.31	0.05	0.23	0.15	8.41	1.42	1.33	222.67	0.27	0.04	0.21	0.14	0.49													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	13.87	2.17	1.75	316.21	0.19	0.04	0.35	0.23	13.48	2.56	1.91	351.24	0.17	0.04	0.34	0.22	0.49													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	9.36	1.51	1.19	178.40	0.34	0.05	0.29	0.16	8.84	1.42	1.32	204.12	0.29	0.04	0.28	0.15	0.47													
0.500			40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	13.19	2.54	1.66	271.23	0.22	0.05	0.41	0.22	12.93	2.56	1.86	308.44	0.19	0.04	0.40	0.22	0.46													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	7.67	1.51	1.22	199.09	0.40	0.04	0.19	0.10	7.82	1.42	1.31	218.50	0.37	0.04	0.20	0.10	0.22													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	11.72	2.56	1.76	317.95	0.25	0.04	0.29	0.15	12.19	2.56	1.85	338.41	0.24	0.04	0.30	0.15	0.25													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	7.54	1.51	1.22	185.15	0.43	0.04	0.24	0.09	8.05	1.60	1.31	202.70	0.39	0.04	0.25	0.10	0.24													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	15.00	11.26	2.24	1.66	271.51	0.29	0.04	0.35	0.14	11.87	2.56	1.75	287.65	0.28	0.04	0.37	0.15	0.28													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	7.78	1.51	1.24	202.57	0.30	0.04	0.19	0.13	7.92	1.60	1.32	221.80	0.27	0.04	0.20	0.13	0.23													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	12.00	10.84	2.56	1.86	339.09	0.18	0.03	0.27	0.18	11.01	2.56	1.94	356.05	0.17	0.03	0.28	0.18	0.31													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	7.85	1.51	1.25	189.99	0.32	0.04	0.25	0.13	7.88	1.60	1.34	208.88	0.29	0.04	0.25	0.13	0.23													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	12.00	10.02	2.56	1.76	289.97	0.21	0.03	0.31	0.17	10.17	2.56	1.84	305.92	0.20	0.03	0.32	0.17	0.30													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	7.88	1.47	1.22	198.71	0.40	0.04	0.20	0.10	7.90	1.42	1.31	219.23	0.36	0.04	0.20	0.10	0.30													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	12.00	10.45	2.56	1.79	323.83	0.25	0.03	0.26	0.13	10.85	2.56	1.93	353.64	0.23	0.03	0.27	0.14	0.24													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	1.50	8.00	8.20	1.56	1.23	187.13	0.43	0.04	0.26	0.10	8.12	1.60	1.32	204.45	0.39	0.04	0.25	0.10	0.31													
0.300	0.20		40.00	40.00	40.00	40.00	2.50	12.00	10.16	2.56	1.86	274.69	0.29	0.04	0.32	0.13	10.37	2.56	1.81	299.56	0.27	0.03	0.32	0.13	0.28													
0.400	0.30		40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	4.00	4.70	1.01	0.91	124.01	0.48	0.04	0.12	0.08	4.63	0.98	0.94	131.96	0.45	0.04	0.12	0.08	0.32													
0.400	0.30		40.00	40.00	40.00	40.00	1.00	8.00	7.63	1.01	0.95	135.15	0.44	0.06	0.19	0.13	7.62	0.98	0.97	140.10	0.43	0.05	0.19	0.13	0.28													

ANÁLISIS Y ESTIMACIÓN DE LA REFLEXIÓN DEL OLEAJE EN ESTRUCTURAS MARÍTIMAS ANTIRREFLEJANTES TIPO JARLAN

DATOS													REGISTRADO										INCIDENTE (LASA)									
p1	p2	p3	B1	B2	B3	h	h	h _s	Tp	Tp	Hs	Hmo	Tp	T01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	Hmo	Tp	T01	L01	B/L01	Hmo/L01	Hmo/h	Hmo/B	CR					
(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)					
0.400	0.30	0.400	20.00	40.00	20.00	40.00	2.00	4.00	5.23	1.98	1.67	299.91	0.20	0.02	0.13	0.09	0.15	5.01	1.83	1.77	320.21	0.19	0.02	0.13	0.08	0.24						
0.400	0.30	40.00	20.00	40.00	20.00	40.00	2.00	8.00	8.92	1.98	1.61	285.42	0.21	0.03	0.22	0.15	0.19	8.86	1.83	1.73	310.87	0.19	0.03	0.22	0.15	0.19						
0.400	0.30	40.00	20.00	32.00	1.00	4.00	4.58	1.03	9.91	1.20	64.00	0.50	0.04	0.14	0.08	0.14	0.08	4.51	1.07	0.95	128.34	0.47	0.04	0.14	0.08	0.32						
0.400	0.30	40.00	20.00	32.00	1.00	4.00	7.42	1.03	0.96	130.62	0.46	0.06	0.23	0.12	0.28	0.12	0.28	7.43	1.07	0.98	135.46	0.44	0.05	0.23	0.12	0.29						
0.400	0.30	40.00	20.00	32.00	2.00	4.00	9.07	2.13	1.56	252.35	0.24	0.04	0.28	0.15	0.28	0.15	0.28	9.07	2.13	1.70	279.37	0.21	0.03	0.28	0.15	0.17						
0.400	0.30	40.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.74	2.13	1.57	254.23	0.24	0.03	0.27	0.15	0.27	0.15	0.27	8.74	2.13	1.71	280.65	0.21	0.03	0.27	0.15	0.17						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	1.00	4.00	4.99	1.05	0.88	117.60	0.68	0.04	0.12	0.06	0.12	0.06	0.12	4.75	0.98	0.95	133.34	0.60	0.04	0.12	0.06	0.32						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	1.00	4.00	8.40	1.05	0.93	129.45	0.62	0.06	0.21	0.11	0.21	0.11	0.21	8.12	0.98	0.97	139.01	0.58	0.06	0.20	0.10	0.32						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	2.00	4.00	5.00	1.98	1.64	292.48	0.27	0.02	0.13	0.06	0.13	0.06	0.13	4.95	1.83	1.75	317.22	0.25	0.02	0.12	0.06	0.22						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	2.00	4.00	8.54	1.98	1.55	273.04	0.29	0.03	0.21	0.11	0.21	0.11	0.21	8.66	1.90	1.68	301.79	0.27	0.03	0.22	0.11	0.18						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	1.00	4.00	4.86	1.01	0.87	111.58	0.72	0.04	0.15	0.06	0.15	0.06	0.15	4.73	0.98	0.94	126.67	0.63	0.04	0.15	0.06	0.30						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	1.00	4.00	8.08	1.05	0.93	124.34	0.64	0.06	0.25	0.10	0.25	0.10	0.25	7.89	1.03	0.98	134.46	0.59	0.06	0.25	0.10	0.32						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.69	2.13	1.52	244.96	0.33	0.04	0.27	0.11	0.27	0.11	0.27	8.89	2.13	1.67	272.89	0.29	0.03	0.28	0.11	0.18						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.35	2.13	1.52	244.94	0.33	0.03	0.26	0.10	0.26	0.10	0.26	8.56	2.13	1.67	273.51	0.29	0.03	0.27	0.11	0.19						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	1.00	4.00	4.80	1.07	0.89	119.07	0.67	0.04	0.12	0.06	0.12	0.06	0.12	4.74	0.95	0.92	127.86	0.63	0.04	0.12	0.06	0.29						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	1.00	4.00	7.67	1.07	0.95	133.82	0.60	0.06	0.19	0.10	0.19	0.10	0.19	7.72	1.07	0.97	139.52	0.57	0.06	0.19	0.10	0.24						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	2.00	4.00	4.60	2.13	1.62	288.39	0.28	0.02	0.11	0.06	0.11	0.06	0.11	4.63	2.13	1.75	315.73	0.25	0.01	0.12	0.06	0.15						
0.400	0.30	60.00	20.00	40.00	2.00	4.00	8.03	2.13	1.54	270.68	0.30	0.03	0.20	0.10	0.20	0.10	0.20	8.27	2.13	1.69	303.89	0.26	0.03	0.21	0.10	0.15						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	1.00	4.00	4.77	1.03	0.90	117.26	0.68	0.04	0.15	0.06	0.15	0.06	0.15	4.70	1.07	0.94	125.96	0.64	0.04	0.15	0.06	0.29						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	1.00	4.00	7.68	1.07	0.95	129.43	0.62	0.06	0.24	0.10	0.24	0.10	0.24	7.71	1.07	0.98	134.97	0.59	0.06	0.24	0.10	0.25						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.79	2.13	1.50	239.56	0.33	0.04	0.27	0.11	0.27	0.11	0.27	8.94	2.13	1.68	274.61	0.29	0.03	0.28	0.11	0.17						
0.400	0.30	60.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.42	2.13	1.50	240.39	0.33	0.04	0.26	0.11	0.26	0.11	0.26	8.64	2.13	1.68	274.97	0.29	0.03	0.27	0.11	0.18						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	40.00	1.00	4.00	4.82	1.03	0.90	123.00	0.65	0.04	0.12	0.06	0.12	4.42	1.07	1.05	157.66	0.51	0.03	0.11	0.06	0.33						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	40.00	1.00	8.00	7.69	1.07	0.95	135.12	0.59	0.06	0.19	0.10	0.19	7.23	1.07	1.05	157.97	0.51	0.05	0.18	0.09	0.30						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	40.00	2.00	4.00	4.93	2.13	1.68	300.30	0.27	0.02	0.12	0.06	0.12	4.79	2.13	1.77	320.42	0.25	0.01	0.12	0.06	0.22						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	40.00	2.00	8.00	8.36	2.13	1.61	284.96	0.28	0.03	0.21	0.10	0.21	8.44	2.13	1.72	308.67	0.26	0.03	0.21	0.11	0.15						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	32.00	1.00	4.00	4.71	0.98	0.90	118.25	0.68	0.04	0.15	0.06	0.15	4.35	0.98	1.03	146.55	0.55	0.03	0.14	0.05	0.30						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	32.00	1.00	8.00	7.64	0.98	0.95	129.96	0.62	0.06	0.24	0.10	0.24	7.13	0.98	1.03	150.02	0.53	0.05	0.22	0.09	0.29						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	32.00	2.00	4.00	8.70	2.13	1.56	252.19	0.32	0.03	0.27	0.11	0.27	8.82	2.13	1.69	276.46	0.29	0.03	0.28	0.11	0.13						
0.400	0.30	0.20	40.00	20.00	20.00	32.00	2.00	8.00	8.40	2.13	1.56	252.84	0.32	0.03	0.26	0.11	0.26	8.56	2.13	1.70	277.95	0.29	0.03	0.27	0.11	0.13						