



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA DE DOCTORADO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURA DE LOS TRANSPORTES

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE LA EFECTIVIDAD DE LAS
ESTRUCTURAS ANTIRREFLEJANTES EN LA
ATENUACIÓN DE LA RESONANCIA EN PUERTOS

AUTOR

Jose A. GONZÁLEZ-ESCRIVÁ

DIRECTOR

Dr. Josep R. MEDINA FOLGADO

VALENCIA, julio de 2017

A mi maravillosa familia.

Agradecimientos

A *Ramón, José y José María* del CEDEX.

a *Lisardo, Silvia, Camilo, Daniel, José, Diego* de cyes,

a *Antonio* de Iberport,

a *Pepe Andreu, Ana, Mapi, Jorge, Gloria* y a mis compañeros *Vicent, Pepe, José Cristóbal* y *Esther* de la UPV,

a *Rafa*,

a mi amigo *Joaquín* de Ingeomar

y especialmente a mi director de tesis, compañero y amigo *Josep*.

También deseo expresar mi reconocimiento a *cyes* por permitir el uso de los datos correspondientes a los ensayos de circuitos rectangulares y por la financiación en los proyectos MUCAR y CADIMA, así como al *Ministerio de Ciencia y Tecnología*, al *Ministerio de Educación*, y al *Ministerio de Fomento* por la financiación recibida para el desarrollo de los proyectos de investigación MUDIVAR (REN2002-02951), REDIVAR (TRA2006-11114) y CADIMA (P11/08).

Resumen

La resonancia en puertos es el fenómeno de amplificación de energía que tiene lugar en un puerto o dársena cuando las ondas incidentes tienen frecuencias próximas a las naturales de oscilación de la masa de agua en el puerto o dársena, típicamente en el rango $30 < T[s] < 300$. Estas ondas de baja frecuencia, en condiciones de resonancia, se manifiestan como ondas estacionarias magnificando las amplitudes de las oscilaciones y las intensidades de las corrientes en la bocana y en el interior del puerto. Los efectos sobre las condiciones operativas y de seguridad abarcan desde el cese de actividades portuarias, daños en los sistemas de amarre y buques, hasta inundaciones de las áreas contiguas al perímetro de las dársenas portuarias.

Los modos naturales de oscilación dependen de la geometría de la masa de agua confinada, mientras que la amplificación responde a la amplitud de la onda incidente, a la capacidad disipativa de los contornos y a la interna del fluido. Las medidas estructurales para paliar los efectos de la resonancia en puertos y dársenas introducen cambios en la geometría o en el fondo, reducen la energía que entra al puerto o mejoran los mecanismos de disipación en el interior del puerto. Pero la disipación de las ondas de baja frecuencia requiere mecanismos de fricción de gran extensión en la dirección de las ondas incidentes o mecanismos de disipación turbulenta, difícilmente compatibles con los exigentes requerimientos de espacio marítimo en el interior de los puertos y con la funcionalidad operativa de atraque de las estructuras portuarias.

En muelles de gravedad para uso comercial, las estructuras antirreflejantes habituales para la atenuación de oleaje son las estructuras verticales tipo Jarlan, que consisten en un paramento frontal perforado, a través del cual la ola penetra en la cámara hueca interior de la estructura, propagándose hasta ser reflejada en el paramento trasero impermeable, nuevamente hacia el paramento frontal, que atraviesa para interferir con el oleaje incidente. Este mecanismo de disipación por interferencia de ondas en oposición de fase se muestra ineficaz para ondas de baja frecuencia, debido a que requieren unos anchos excesivos para una amortiguación efectiva.

La presente Tesis Doctoral plantea la extensión de los efectos técnicos disipativos de las estructuras Jarlan para la atenuación de las ondas de baja frecuencia mediante el uso de *circuitos disipativos largos*. Los circuitos en las estructuras verticales de cajones prefabricados de celdas aligeradas quedan constituidos por la conexión entre celdas contiguas, delimitando espacios en los que el agua que penetra en ellos a través de las aberturas en el panel frontal perforado, puede propagarse y reflejarse al final del circuito, como en una cámara de una estructura tipo Jarlan convencional. Dado que el circuito puede extenderse en distintas direcciones, la longitud del circuito puede ser mayor que el ancho de la estructura, no siendo necesario emplear estructuras de mayores dimensiones. La estructura tipo Jarlan con circuitos largos para la atenuación de la resonancia en puertos se muestra una solución eficaz en la disipación de ondas largas, directamente funcional como muelle, así como viable constructiva y económicamente.

A partir de la definición de circuito, la Tesis Doctoral desarrolla sistemáticamente los pasos necesarios para obtener la caracterización disipativa de una estructura disipativa de circuitos largos, estableciendo finalmente *un modelo para la optimización del diseño* de dichas estructuras.

La caracterización disipativa se lleva a cabo mediante la experimentación física a gran escala de estructuras con circuitos formados por celdas circulares o celdas cuadradas, diseñados inicialmente con los criterios de diseño de las estructuras tipo Jarlan para la atenuación de ondas de baja frecuencia. El análisis de las incertidumbres asociadas a la experimentación tradicional en ensayos con ondas de baja frecuencia motiva el cambio en la metodología experimental habitualmente utilizada con oleaje.

La presente Tesis Doctoral combina una *nueva metodología experimental*, que aprovecha las inevitables multirreflexiones en los canales de ensayos 2D para la simulación de las condiciones resonantes de una dársena rectangular estrecha aislada, con un *modelo exponencial de disipación de energía*, que se ajusta apropiadamente a la fase de amortiguación que tiene lugar en los ensayos cuando cesa el aporte de energía exterior por parte del generador de ondas. Además, la Tesis Doctoral introduce el concepto de *longitud de circuito efectiva*, como indicador de la eficiencia y parámetro de diseño.

El modelo exponencial de amortiguación permite la definición de diversos indicadores de la eficiencia disipativa de las estructuras antirreflejantes ensayadas así como de los propios circuitos disipativos independientemente, incluyendo la estimación del *coeficiente de reflexión* con lo que es posible la comparación con otras metodologías.

Por último, el modelo exponencial integrado en la metodología de experimentación y análisis, combinado con los resultados experimentales es utilizado en esta Tesis Doctoral para estimar la *longitud óptima de circuito* en función del tipo de celda, así como para obtener el diseño óptimo teórico de las estructuras antirreflejantes de circuitos disipativos largos para la atenuación de la resonancia en puertos.

Resum

La ressonància en ports és el fenomen d'amplificació d'energia que té lloc en un port o dàrsena quan les ones incidents tenen freqüències pròximes a les naturals d'oscil·lació de la massa d'aigua en el port o dàrsena, típicament en el rang $30 < T[s] < 300$. Aquestes ones de baixa freqüència, en condicions de ressonància, es manifesten com ones estacionàries magnificant les amplituds de les oscil·lacions i les intensitats de les corrents en la bocana i en l'interior del port. Els efectes sobre les condicions operatives i de seguretat van des del cessament d'activitats portuàries i danys en els sistemes d'amarratge i vaixells, fins a inundacions de les àrees contigües al perímetre de les dàrsenes portuàries.

Els modes naturals d'oscil·lació depenen de la geometria de la massa d'aigua confinada, mentre que l'amplificació respon a l'amplitud de l'ona incident i a la capacitat dissipativa dels contorns i interna del fluid. Les mesures estructurals per a pal·liar els efectes de la ressonància en ports i dàrsenes introdueixen canvis en la geometria o en el fons, redueixen l'energia que entra al port o milloren els mecanismes de dissipació en l'interior del port. Però la dissipació de les ones de baixa freqüència requereixen mecanismes de fricció de gran extensió en la direcció de las ones incidents o mecanismes de dissipació turbulenta, difícilment compatibles amb els exigents requeriments d'espai marítim en l'interior dels ports i amb la funcionalitat operativa d'atraca de les estructures portuàries.

En molls de gravetat per a ús comercial, les estructures antireflectants habituals per a l'atenuació d'onatge són les estructures verticals tipus Jarlan, que consisteixen en un parament frontal perforat, a través del qual l'ona penetra en la cambra buida interior de l'estructura, propagant-se fins a ser reflectida en el parament posterior impermeable, de nou cap al parament frontal, que travessa per a interferir amb l'onatge incident. Aquest mecanisme de dissipació per interferència d'ones en oposició de fase es mostra ineficaç per a ones de baixa freqüència, a causa de que requereixen uns amplex excessius per a un amortiment efectiu.

La present Tesi Doctoral planteja l'extensió dels efectes tècnics dissipatius de les estructures Jarlan per a l'atenuació de las ones de baixa freqüència mitjançant l'us de *circuits dissipatius llargs*. Els circuits en les estructures verticals de caixons prefabricats de cel·les alleugerides queden constituïts per la connexió entre cel·les contigües, delimitant espais en els que l'aigua que penetra en ells a través de les obertures en el panell frontal perforat, puguen propagar-se i reflectir-se al final del circuit, com en una cambra d'una estructura tipus Jarlan convencional. Com que el circuit pot estendre's en distintes direccions, la longitud del circuit pot ser major que l'ample de l'estructura, per tant no necessita estructures de majors dimensions. L'estructura tipus Jarlan amb circuits llargs per a l'atenuació de la ressonància en ports es mostra com una solució eficaç en la dissipació d'ones llargues, directament funcional com a moll, i a més a més, viable constructiva i econòmicament.

A partir de la definició de circuit, la Tesi Doctoral desenvolupa sistemàticament els passos necessaris per obtindre la caracterització dissipativa d'una estructura antireflectant de circuits llargs, establint finalment *un model per a l'optimització del disseny* de dites estructures.

La caracterització dissipativa es du a terme mitjançant l'experimentació física a gran escala d'estructures amb circuits formats per cel·les circulars o cel·les quadrades, dissenyades inicialment amb els criteris de disseny de les estructures tipus Jarlan per a l'atenuació d'ones de baixa freqüència. L'anàlisi de les incerteses associades a l'experimentació tradicional en assajos amb ones de baixa freqüència motiva el canvi en la metodologia experimental habitualment utilitzada amb onatge.

La present Tesi Doctoral combina una *nova metodologia experimental*, que aprofita les inevitables multirreflexions en els canals d'assajos 2D per a la simulació de les condicions ressonants d'una dàrsena rectangular estreta aïllada, amb un *model exponencial de dissipació d'energia*, que s'ajusta apropiadament a la fase d'amortiment, la qual té lloc als assajos quan cessa l'aportació d'energia exterior per part del generador d'ones. De forma addicional, la tesi introdueix el concepte de *longitud de circuit efectiva*, com a indicador d'eficiència i paràmetre de disseny.

El model exponencial d'amortiment permet la definició de diversos indicadors de l'eficiència dissipativa de les estructures assajades i, fins i tot dels propis circuits dissipatius independentment, incloent l'estimació del *coeficient de reflexió* amb el qual es possible la comparació amb altres metodologies.

Per últim, el model exponencial integrat en la metodologia d'experimentació i anàlisi, combinat amb els resultats experimentals, es utilitzat com a novetat en esta Tesi Doctoral per a estimar la *longitud òptima de circuit* en funció del tipus de cel·la, així com per a obtindre el disseny òptim teòric de les estructures antireflectants de circuits dissipatius llargs per a l'atenuació de la ressonància en ports.

Abstract

The resonance in ports is the phenomenon of energy amplification that takes place in a port or a basin if the incident waves have frequencies close to those of the natural oscillation of the mass of water in the port or basin, typically in the range $30 < T[s] < 300$. These low frequency waves, under resonant conditions, are standing waves that magnifies the amplitudes of the oscillations and currents, in the mouth and inside the port. The effects on operational and safety conditions range from the cessation of port activities, damage to mooring systems and ships to floods in areas adjacent to the perimeter of port basins.

The natural modes of oscillation rely on the geometry of the confined water mass, while amplification responds to the amplitude of the incident wave, the dissipative capacity of the contours and fluid internal dissipation. Structural measures to mitigate the effects of resonance in ports and basins introduce geometry or bathymetry modifications, reduce energy entering the port or enhance dissipation mechanisms inside the port. Nevertheless, the dissipation of low-frequency waves requires extensive friction mechanisms in the direction of incident waves or turbulent dissipation mechanisms, which are difficult to cope with the demanding maritime space requirements inside the ports and with the berthing functionality of inner port structures.

The typical anti-reflective structures for wave attenuation in gravity wall quays in commercial ports are Jarlan-type vertical structures, which consists of a perforated front wall, through which the wave penetrates the hollow interior chamber of the structure, propagating along till reflexing in the reflective rear face, again towards the front wall, and finally passing through it to interfere with the incident waves. The excessive width required for effective damping by phase interference dissipation mechanism makes it ineffective for low frequency waves.

The present Doctoral Thesis suggests the extension of the dissipative technical effects of the Jarlan-type structures for attenuation of low frequency waves with use of long dissipative circuits. The circuits in vertical structures of prefabricated

caissons with hollow cells are created by the connection between contiguous cells, delimiting spaces in which the water that enter through the perforated front wall openings, can be propagated and reflected at the end of the circuit, as in a chamber of a conventional Jarlan type structure. Since the circuit may extend in different directions, the length of the circuit may be greater than the width of the structure, thus making unnecessary to employ structures of larger dimensions. Therefore, the Jarlan-type structure with long dissipative circuits for attenuation of resonance in ports is an effective solution in low frequency wave dissipation; it is functional as a quay, as well as constructively and economically feasible.

Once circuit concept is defined, the Doctoral Thesis systematically progresses through the compulsory stages to obtain the characterization of long-circuit dissipative structure, to end with an optimization model for the dissipative design of such structures.

Large-scale physical tests of structures with circuits formed by circular cells or square cells for the attenuation of low frequency waves, being initially designed with the criteria of the Jarlan-type structures, were carried out to obtain the dissipative characterization. Scale model uncertainties in experiments with long frequency waves were analyzed consequently encouraging changes in the experimental methodology.

The Doctoral Thesis combines an original experimental methodology, which takes advantage of the inevitable multi-reflections in the 2D flumes for the simulation of the resonant conditions in an isolated narrow rectangular basin, with an exponential model of energy decay, which adjusts properly to the damping that occurs in the tests when the input of external energy by the wave generator stops. Additionally, the thesis introduces the length-effective circuit concept, as an indicator of efficiency and design parameter.

A number of dissipative efficiency indicators including an estimation of the reflection coefficient of the tested antireflective structures and even the individual dissipative circuits, are defined with the exponential decay model, so making possible the comparison with other methodologies.

Finally, a novel technique combining the exponential decay model, which is integrated in the methodology of experimentation and analysis, with the experimental results, is used in this Doctoral Thesis to estimate the optimal circuit length according to the type of cell and to obtain the a theoretic optimum design of the anti-reflective structures of long dissipative circuits for the attenuation of the resonance in ports.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Resum	v
Abstract	vii
Índice general	1
Índice	3
Índice de figuras	11
Índice de tablas	23
Notación	25
I Introducción	29
II La resonancia en puertos	39
III Estructuras antirreflejantes para atenuar las ondas en los puertos	93
IV Estructuras marítimas ARJ de circuitos disipativos largos (ARJ-R)	145
V Eficiencia de las estructuras ARJ-R: experimentación y optimización.	167
VI Conclusiones	223
VII Referencias	231
VIII Anejo 1 Resultados de la experimentación física a escala reducida	249
IX Anejo 2 Publicaciones relacionadas con la tesis	285
X Anejo 3 Patentes relacionadas con la tesis	297

ÍNDICE

I Introducción	29
I.1. Motivación de la investigación.	30
I.2. Objetivos.	33
I.3. Estructura de la tesis.	34
II La resonancia en puertos	39
II.1. Mecanismos de generación de las ondas largas asociadas a la resonancia portuaria.	43
II.1.1. Ondas largas producidas por actividad sísmica.	46
II.1.2. Ondas largas producidas por efectos atmosféricos.	48
II.1.3. Ondas largas de infragravedad	50
II.1.3.1. Ondas forzadas asociadas a grupos de olas	51
II.1.3.1. Ondas libres y ondas estacionarias	52
II.2. Métodos analíticos para la estimación de la respuesta resonante	55
II.2.1. Analogía mecánica	56
II.2.1.1. Dársena individual unidimensional	57
II.2.1.2. Dársenas interconectadas.....	59
II.2.2. Hidrodinámica de los modos libres de oscilación	60
II.2.2.1. Masas de agua confinadas aisladas (dársena cerrada).....	61
II.2.2.2. Masas de agua confinadas conectadas con el exterior (dársena abierta)	67
II.2.3. Analogía con la teoría de circuitos para el caso general de dársenas interconectadas entre sí	76
II.2.3.1. Circuito RLC	77
II.2.3.1. Oscilación de una masa de agua con fricción	77
II.2.3.2. Dársenas interconectadas.....	79
II.3. Experimentación física y numérica	79
II.3.1. Experimentación física a escala reducida	80
II.3.1.1. Efectos de escala y de modelo	81
II.3.2. Experimentación numérica.	82
II.3.2.1. Modelos de propagación de ondas	84

II.3.2.2. Modelos para la obtención de la respuesta resonante de las ondas largas en el interior de recintos.....	85
II.3.2.3. Transitoriedad de la respuesta portuaria frente a las ondas largas.....	86
II.4. Datos en prototipo.....	86
II.4.1. Casos de mediciones en prototipo asociados a problemáticas locales portuarias.....	87
II.5. Resumen y conclusiones del Capítulo II.....	89
III Estructuras antirreflejantes para atenuar las ondas en los puertos.....	93
III.1. Aspectos básicos del equilibrio de energía en la interacción de ondas y estructuras.....	95
III.1.1. Reflexión.....	95
III.1.2. Disipación.....	96
III.1.2.1. Disipación por rotura.....	97
III.1.2.1. Disipación por fricción.....	97
III.1.2.2. Otros mecanismos de disipación.....	98
III.2. Estructuras antirreflejantes tipo Jarlan para ondas de corto periodo.....	100
III.2.1. Estructuras ARJ completamente perforadas.....	105
III.2.2. Estructuras ARJ parcialmente perforadas.....	108
III.2.3. Estructuras ARJ con múltiples cámaras.....	111
III.2.4. Estructuras ARJ con cámaras cerradas superiormente.....	115
III.2.5. Estructuras ARJ con relleno de escollera interior.....	115
III.2.6. Estructuras ARJ con paneles perforados interiores horizontales ...	116
III.2.7. Otros diseños particulares de estructuras ARJ.....	117
III.2.7.1. <i>Creación de circuitos disipativos largos</i>	117
III.2.7.2. <i>Incorporación de geometrías en planta para la dispersión direccional de la reflexión</i>	119
III.2.7.3. <i>Incorporación de geometrías en planta para la creación de flujos circulares de eje vertical</i>	120
III.2.7.4. Incorporación de rugosidad artificial que incremente la disipación por fricción.....	123
III.2.7.5. <i>Incorporación de elementos para el aprovechamiento energético de las olas</i>	124
III.2.8. Efecto de la oblicuidad y aleatoriedad del oleaje.....	125
III.2.8.1. Efecto de la oblicuidad del oleaje.....	125
III.2.8.1. Efecto de la irregularidad del oleaje.....	126

III.3. Estructuras antirreflejantes para ondas de largo periodo.....	127
III.3.1. Elementos para el bloqueo selectivo de las ondas largas a la entrada de los puertos.....	127
III.3.2. Elementos con bajo coeficiente de reflexión para la atenuación de las ondas largas en el interior de los puertos	131
III.3.2.1. Estructuras porosas compuestas de escolleras o bloques de hormigón.	132
III.3.2.2. Estructuras ARJ combinadas con porosas compuestas de escolleras o bloques de hormigón.	135
III.3.2.3. Estructuras ARJ OWLS.	136
III.3.2.4. Estructuras atenuadoras de onda larga que provocan giro de flujo de eje horizontal.	138
III.3.2.1. Estructuras ARJ de circuitos disipativos largos	139
III.4. Estructuras antirreflejantes en España.....	141
III.5. Resumen y conclusiones del Capítulo III.	142
IV Estructuras marítimas ARJ de circuitos disipativos largos (ARJ-R)	145
IV.1. Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión del oleaje (EP2504496B1)	147
IV.1.1. Definiciones. Concepto de circuito disipativo o antirreflejante. ...	148
IV.1.2. Estructura ARJ de circuitos.	150
IV.2. Estructura ARJ de circuitos disipativos largos para atenuación de la resonancia (ARJ-R)	154
IV.3. Resumen y conclusiones del Capítulo IV	165
V Eficiencia de las estructuras ARJ-R: experimentación y optimización.	167
V.1. Metodología experimental para el estudio de la efectividad de estructuras antirreflejantes ante onda larga en condiciones de resonancia	169
V.1.1. Generación de ondas largas	170
V.1.2. Estimación del oleaje incidente y reflejado	171
V.1.2.1. Técnicas basadas en el método 2-point	171
V.1.2.1. Técnicas basadas en la medición directa.....	172
V.1.3. Nivel medio del agua	172
V.1.4. Rebase	172
V.1.5. Efectos de escala y de modelo.....	173
V.1.5.1. Efectos de modelo	173

V.1.5.2. Efectos de escala	173
V.1.6. Nueva Metodología Experimental específica de Simulación de Respuesta Resonante (MESRR) para el estudio de estructuras disipativas .	179
V.2. Descripción de los ensayos a escala reducida SRR de las estructuras ARJ-R	181
V.2.1. Instalación para la experimentación: Canal de ensayos y generador de ondas	181
V.2.2. Diseño experimental	184
V.2.2.1. Selección de la escala de los experimentos	185
V.2.2.1. Ubicación de la instrumentación y del modelo en el canal de ensayos.....	186
V.2.2.1. Matriz de ensayos.....	187
V.2.3. Construcción del modelo e impermeabilización	189
V.3. Metodología de análisis específica para los ensayos de Simulación de Respuesta Resonante (SRR).....	194
V.3.1. Modelo exponencial para la fase de amortiguación de los ensayos SRR.	194
V.3.1.1. Cancelación del efecto disipativo de la dársena-canal en los experimentos SRR	196
V.3.1.2. Corrección por tramos completamente impermeables	196
V.3.1.3. Reducción de la tasa de amortiguación de una estructura ARJ-R a un circuito disipativo equivalente de igual disipación.	197
V.3.1.4. Coeficiente de reflexión.....	198
V.3.1.1. Indicadores de eficiencia	198
V.3.2. Estimación de la energía en el dominio del tiempo	199
V.4. Resultados experimentales.	201
V.4.1. Series temporales de evolución de la superficie libre en el tiempo.	201
V.4.2. Resultados de la eficiencia de las estructuras ARJ-R	206
V.4.2.1. Obtención de la evolución de la energía en el tiempo y ajuste del modelo exponencial de disipación. Efectividad bruta.	207
V.4.2.2. Cancelación del efecto de la dársena-canal y de modelo. Efectividad neta de las estructuras ARJ-R.....	208
V.4.2.3. Reducción al circuito equivalente. Efectividad neta teórica máxima de los circuitos disipativos de las estructuras ARJ-R ensayadas.	209

V.4.2.4. Análisis de los registros gráficos. Estimación de la longitud eficaz de circuito.	211
V.5. Modelo para la optimización de la eficiencia disipativa de estructuras ARJ-R.....	213
V.5.1. Optimización de estructuras ARJ-R a partir de la longitud óptima de circuito.....	213
V.5.2. Introducción de la longitud eficaz de circuito en el modelo de optimización	214
V.6. Aplicación del modelo de optimización del diseño de estructuras antirreflejantes para la atenuación de ondas largas	215
V.6.1. Longitud de circuito óptimo corregido con la longitud eficaz	215
V.6.2. Estructuras ARJ-R óptimas.....	217
V.7. Resumen y conclusiones del capítulo V	220
VI Conclusiones	223
VI.1. Síntesis y conclusiones.	224
VI.1.1. Nuevo concepto: circuitos, estructuras ARJ-R de circuitos disipativos largos para atenuar oscilaciones resonantes en puertos.	225
VI.1.2. Nueva metodología experimental: MESRR.	226
VI.1.3. Nueva metodología de análisis basada en el modelo exponencial de amortiguación de las oscilaciones.	227
VI.1.4. Nueva metodología de diseño óptimo para las estructuras ARJ-R. .	229
VI.1.5. Diferencias entre circuitos rectangulares y de celdas circulares. ..	229
VI.2. Líneas de investigación futuras.....	230
Referencias.....	231
Anejo 1 Resultados de la experimentación física a escala reducida	249
1. Denominación de los ensayos de SRR.	251
2. Resultados del análisis espectral.	252
3. Representación gráfica de las series temporales de elevación de la superficie libre.	261
3.1. Estructura impermeable (REF).....	261
3.2. Estructuras ARJ-R con dos circuitos disipativos.....	265
3.3. Estructuras ARJ-R con cuatro circuitos disipativos	269
3.4. Estructuras ARJ-R con seis circuitos disipativos	278
4. Gráficas de ajuste exponencial de la energía en la fase de amortiguación de las SRR.....	282

Índice

IX Anejo 2 Publicaciones relacionadas con la tesis	285
X Anejo 3 Patentes relacionadas con la tesis	297

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1. Tipos de dársenas en función del grado de conexión con el exterior (Biesel y Le Méhauté, 1956).....	41
Figura II.2. Tipología básica de dársenas para el análisis de la resonancia: e) la existencia de obstáculos, f) las variaciones geométricas en planta y alzado, y g) combinación de obstáculos y geometría (Biesel y Le Méhauté, 1956).....	41
Figura II.3. Espectro de energía de las ondas en el mar (Adaptado de Munk, 1950).	44
Figura II.4. Mecanismos de generación de onda larga (adaptado de Rabinovich, 2009).	46
Figura II.5. Puerto de Ciutadella (Menorca) en la rissaga del 21 de Junio de 1984 (de Rabinovich y Monserrat, 1996).	49
Figura II.6. Principales mecanismos de generación de las ondas largas de infragravedad en la costa (adaptado de Rabinovich, 2009).	50
Figura II.7. Perfil de la <i>BLW</i> en el grupo de olas.	51
Figura II.8. Efecto de la tensión de radiación en la zona de rotura (adaptado de Le Méhauté, 1976).	52
Figura II.9. Oscilación libre subamortiguada comparada con la que se produciría sin amortiguación.	57
Figura II.10. Evolución de las oscilaciones en función de la amortiguación.	58
Figura II.11. Factor de amplificación en función de la fricción y frecuencias exterior y natural del sistema (adaptado de Sorensen y Thomson, 2008).	59
Figura II.12. Perfil de la superficie libre para los cuatro primeros modos de oscilación de la dársena cerrada con profundidad uniforme.....	62
Figura II.13. Esquema de dos dársenas interconectadas entre sí por un canal.....	66
Figura II.14. Perfil de la superficie libre para los cuatro primeros modos de oscilación de la dársena cerrada-abierta con profundidad uniforme.	69
Figura II.15. Respuesta teórica de una dársena rectangular estrecha con un extremo completamente abierto (adaptado de Sorensen y Thompson, 2008).	70
Figura II.16. Factor de amplificación de una dársena rectangular bidimensional parcialmente abierta en un extremo (adaptado de Sorensen y Thompson, 2008)..	73
Figura II.17. Dársenas circulares alineadas y conectadas alineadas (Lee y Raichlen, 1971).	75

Figura II.18. Dársenas circulares alineadas y conectadas en ángulo (Lee y Raichlen, 1971).....	76
Figura II.19. Esquema de un circuito eléctrico RLC.	76
Figura III.1. Tipología de pared porosa.	98
Figura III.2. Diseños geométricos que provocan disipación por flujo giratorio de la masa de agua.....	99
Figura III.3. Parametrización básica de una estructura marítima para atenuación de ondas (adaptado de Oumeraci, 2010).	101
Figura III.4. Clasificación de las estructuras marítimas más habituales para la atenuación de ondas (Oumeraci, 2010).	101
Figura III.5. Respuesta cualitativa de algunas de las tipologías de estructuras para la no transmisibilidad (adaptada de Oumeraci, 2010).	102
Figura III.6. Muelle sobre pilas con talud de escollera interior.	103
Figura III.7. Estructura marítima antirreflejante propuesta por Jarlan (1961)....	103
Figura III.8. Variaciones a partir de la tipología Jarlan para estructuras verticales (adaptada de Huang, 2011).	104
Figura III.9. Estructura ARJ completamente perforada de una cámara	105
Figura III.10. Disipación para la tipología Jarlan (adaptada de Oumeraci, 2010).106	
Figura III.11. C_r experimental vs. B/L para diferentes porosidades. ARJ con una cámara completamente perforada (Garrido, 2012).	108
Figura III.12. Estructuras ARJ: de una cámara completamente perforada (izquierda) y de dos cámaras parcialmente perforada con $d_c < d$ (derecha).....	109
Figura III.13. Respuesta comparada de estructuras ARJ completa y parcialmente perforada (Huang et al, 2011).	109
Figura III.14. Relación entre la energía reflejada y el ancho relativo de cámara para el diseño ARJ con perforación parcial formado por elementos modulares GMAR (González-Escrivá et al, 2007).....	111
Figura III.15. Sección de la estructura ARJ de cámaras múltiples para el dique de Porto Torres, Italia (de Oumeraci et al, 2001).....	112
Figura III.16. Esquema estructura ARJ completamente perforada de dos cámaras	112
Figura III.17. Comparación entre las respuestas de estructuras ARJ con dos cámaras y con una cámara ($G_2 = \infty$, sin pared intermedia) con igual ancho de la zona disipativa. (Li et al, 2003).	113
Figura III.18. C_r en función del ancho relativo para diferentes porosidades. Estructura ARJ multicámara completamente perforadas (Oumeraci, 2009).	114

Figura III.19. C_r en función del ancho relativo para diferentes porosidades. Estructura ARJ de dos cámaras completamente perforadas (Garrido, 2012).....	114
Figura III.20. Esquemas de estructuras ARJ con relleno de escollera.....	115
Figura III.21. Respuesta de una estructura ARJ con y sin relleno (Huang, 2011)..	116
Figura III.22. Respuesta de una estructura ARJ con y sin panel horizontal poroso (Huang, 2011).....	117
Figura III.23. Circuitos en un modelo físico a escala en el canal de oleaje y viento del LPC-UPV (Martínez et al, 2010).	118
Figura III.24. Respuesta de varios cajones con combinaciones de circuitos distintas (Martínez et al, 2010).	119
Figura III.25. Ejemplos de geometrías en planta para la dispersión direccional de la reflexión.....	120
Figura III.26. Estructura ARJ con bloque IGLOO (Shiraishi et al, 1975)	121
Figura III.27. Estructura ARJ formada por bloques ARPA (González-Escrivá, 2007).	121
Figura III.28. Relación entre la energía reflejada y el ancho relativo de cámara para el diseño ARJ con perforación parcial formado por elementos modulares ARPA (González-Escrivá et al, 2007).	122
Figura III.29. Estructura ARJ de pantallas cilíndricas (Polimón, 2002).....	123
Figura III.30. Paneles verticales serrados y dentados para incrementar la fricción (Neelami y Sandhya, 2003)	123
Figura III.31. Sistemas de aprovechamiento de la energía de las olas del mar según el principio de captación (Ibañez, 2008)	125
Figura III.32. Respuesta típica de estructura ARJ totalmente perforada con oleaje oblicuo (Huang, 2011)	126
Figura III.33. Coeficientes de reflexión par oleaje regular e irregular (Huang, 2011)	126
Figura III.34. Resonadores en canal y puerto (Valenbois, 1954)	128
Figura III.35. Modos principales de resonancia canal-resonador (James, 1968)...	128
Figura III.36. Valores en resonancia obtenidos con modelo analítico (Wu 1992)..	129
Figura III.37. Analogía circuito eléctrico de la teoría del filtro de oleaje (Mochizuki 1990)	129
Figura III.38. Aplicación de la teoría de filtro de oleaje al diseño de un resonador para onda larga como puerto exterior (Nakamura y Morita, 1998)	130

Figura III.39. Diseño de resonador para absorber onda de tsunami (Latt y Nakamura, 2011). Solo se muestra la geometría para Layout E.	130
Figura III.40. Respuestas disipativas de estructuras porosas emergidas a 10 m de profundidad (Hiraishi et al, 2009).....	133
Figura III.41. Estructura porosa emergida y “sumergida” (con coronación a nivel del agua).....	133
Figura III.42. Comparativa de la respuesta de las estructuras emergida y con cota de coronación a nivel del agua para distintos periodos de onda incidente (Tanaka et al, 2014).....	134
Figura III.43. Efecto de la variación del nivel de agua respecto de la cota de coronación (Tanaka et al, 2014)	134
Figura III.44. Estructuras ARJ combinadas con porosas de escollera o bloques de hormigón (Ohshima et al, 2007).....	135
Figura III.45. Muro en L permeable que sustenta a una estructuras porosas de escollera o bloques de hormigón. C_r vs $T[s]$ (Hiraishi et al, 2009).....	135
Figura III.46. Comparativa de distintas estructuras porosas respecto del coeficiente de reflexión frente al ancho relativo B/L (Hiraishi et al, 2009).....	136
Figura III.47. Estructura ARJ OWLS (Ohshima et al, 2009; Nakahima et al, 2011).137	
Figura III.48. Respuesta de la estructura OWLS (Nakahima et al, 2011).	137
Figura III.49. Anchura para una misma respuesta disipativa (Nakahima et al, 2011).	138
Figura III.50. Estructuras ECO Breaker y ECO Breaker 2 (Cho y Kim, 2008).	138
Figura III.51. Respuesta ECO Breaker 2 (Cho y Kim, 2008).	139
Figura III.52. Distintos tipos de circuitos en estructuras ARJ para la atenuación de ondas largas (González-Escrivá y Medina, 2012).....	140
Figura III.53. Respuesta en el dominio del tiempo de una estructura ARJ con circuitos disipativos largos comparándola con la de una estructura vertical reflejante (González-Escrivá y Medina, 2012).....	141
Figura IV.1. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por celdas de un cajón. 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 (Medina et al, 2016).	151
Figura IV.2. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades circulares formadas por celdas de una cajón 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'), que permite reducir la reflexión de ondas de un amplio rango de periodos (Medina et al, 2016).	151
Figura IV.3. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por bloques modulares ARPA (Garrido et al, 2009), 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'), que permite reducir la reflexión tanto de ondas de periodos altos como también bajos, pero menos eficiente en los periodos intermedios (Medina et al, 2010).	152
Figura IV.4. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por bloques, 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, aumentando las pérdidas de la energía del oleaje por fricción (Medina et al, 2010).	154
Figura IV.5. Planta de los cajones base para las ARJ-R considerados en la presente investigación.	155
Figura IV.6. Sección de la estructura ARJ-R en la presente investigación.	156
Figura IV.7. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-1.	160
Figura IV.8. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-2.	161
Figura IV.9. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-3.	162
Figura IV.10. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-1.	163
Figura IV.11. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-2.	164
Figura IV.12. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-3.	165
Figura V.1. Superficie libre generada ($d/L=0.1$, $Ur=25.4$) en canal de oleaje en cuatro ubicaciones distintas. (Oliveira et al, 2017)	170
Figura V.2. Representación típica del efecto del número de <i>Reynolds</i> en el coeficiente de arrastre para varias formas geométricas. (Simiu y Scanlan, 1996).177	
Figura V.3. Representación típica del coeficiente de arrastre de un cilindro vs <i>Re</i> . Adaptado de Simiu y Scanlan, (1996).	178
Figura V.4. Efecto de escala en la propagación de oleaje por efecto de la viscosidad cinemática. (Schütrumpf, 2001).	178

Figura V.5. Canal de oleaje y viento de grandes dimensiones. Vista general (fuente: CEDEX, 2017).	181
Figura V.6. Vista cenital de la pala generadora de ondas estanca. (fuente: CEDEX, 2017).....	182
Figura V.7. Canal de oleaje de grandes dimensiones. Perfil longitudinal y sección transversal. (fuente: CEDEX, 2011 y 2012).	183
Figura V.8. Sección de la estructura ARJ-R en la presente investigación (escala prototipo).	184
Figura V.9. Distribución de la instrumentación y ubicación de la sección en el canal de ensayos. Dimensiones en metros (en negro: escala de prototipo; en rojo y en paréntesis: escala de modelo).....	187
Figura V.10. Construcción del modelo. Celdas circulares.	189
Figura V.11. Construcción del modelo. Impermeabilización de la banqueta y construcción de la sección ARJ-R estanca.	190
Figura V.12. Modelos de estructura vertical clásica (CEDEX, 2011 y 2012).	191
Figura V.13. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-1 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-1 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de dos circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).	191
Figura V.14. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-2 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-2 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de cuatro circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).	192
Figura V.15. Modelos de estructuras ARJ-R-CU-2 de celdas cuadradas con diseño de cuatro circuitos disipativos largos modificados con geometrías curvas para incrementar la velocidad del flujo en los circuitos (ARJ-R-CU-2* izquierda) y añadiendo elementos disipadores de energía en los circuitos (ARJ-R-CU-2** derecha) (CEDEX, 2011 y 2012).	193
Figura V.16. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-3 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-3 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de seis circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).	193
Figura V.17. Representación esquemática de la evolución de la energía en a) un sistema ideal sin pérdidas (línea azul continua), y b) en un sistema con pérdidas (línea roja discontinua) en un ensayo ejecutado con la MESRR.	195
Figura V.18. Sistemas con idéntica energía disipada. Esquema del canal en planta.	197
Figura V.19. Sistemas equivalentes. Esquema del canal en planta.	198
Figura V.20. Serie temporal típica de los desplazamientos verticales de la superficie libre en un ensayo SRR.....	199

Figura V.21. Estimación de la evolución de la energía de las oscilaciones en el tiempo (fase acumulación + fase amortiguación).	200
Figura V.22. Secuencia para la homogeneización del origen de tiempos y normalización de la energía en la fase de amortiguación de un ensayo SRR.	200
Figura V.23. Espectros de potencia típicos de ensayos SRR medido en el sensor 9 para ondas generadas de $T=45$, 90 y 135 s.	203
Figura V.24. Representación típica de la envolvente y valor medio de los desplazamientos de la superficie libre con $T=90$ s (escala prototipo).	204
Figura V.25. Representación típica de las series temporales estimadas de evolución de la energía en un ensayo SRR con $T=90$ s (escala prototipo).	204
Figura V.26. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (REF, $T=90$ s, sensor 9).	205
Figura V.27. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (ARJ-R-CI-2, $T=90$ s, sensor 9).	205
Figura V.28. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (ARJ-R-CU-1, $T=90$ s, sensor 9).	206
Figura V.29. Gráfica comparada de los valores de t_{50} para las diferentes estructuras analizadas.	208
Figura V.30. Gráfica comparada de los valores de la energía disipada por oscilación neta para las estructuras antirreflejantes analizadas.	209
Figura V.31. Gráfica comparada de los valores del coeficiente de reflexión neto por circuito equivalente para las estructuras analizadas.	210
Figura V.32. Imagen de la grabación del ensayo SRR correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-2, con $T=90$ s. Flujo vaciante a la salida de las cámaras.	212
Figura V.33. Imagen de la grabación del ensayo SRR correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-1, con $T=90$ s (se aprecia una de las esferas saliendo por la ventana izquierda en la fase vaciante).	212
Figura V.34. Coeficiente de reflexión por circuito frente a la longitud relativa de los circuitos disipativos por tipología.	215
Figura V.35. Coeficiente de reflexión neto por circuito frente a la longitud efectiva relativa de los circuitos disipativos.	216
Figura V.36. Gráfica comparativa de los valores del coeficiente de reflexión neto por circuito empleando la longitud relativa geométrica o efectiva de los circuitos disipativos.	217
Figura V.37. Resultados de la respuesta de un puerto real a oscilaciones resonantes correspondientes a $T[s] = 40$ (izquierda) y $T[s] = 60$ (derecha) sin elementos que absorban la onda larga (gráficos en la parte superior) y con estructuras ARJ-R	

(dispuestas en los tramos marcados en trazo grueso de color amarillo) con coeficiente de reflexión $C_R=0.9$ (gráficas en la parte inferior). 219

Figura A-1.1. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=45s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 253

Figura A-1.2. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=60s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 254

Figura A-1.3. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=75s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 255

Figura A-1.4. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=90s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 256

Figura A-1.5. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=120s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 257

Figura A-1.6. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=135s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 258

Figura A-1.7. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=180s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 259

Figura A-1.8. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=300s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: $x=frecuencia$ en Hz ; $y=espectro$ de potencia)..... 260

Figura A-1.9. Modelo a escala 1/11.6 de la estructura vertical completamente reflejante (REF)..... 261

Figura A-1.10. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud de 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 261

Figura A-1.11. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 262

Figura A-1.12. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 262

Figura A-1.13. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	263
Figura A-1.14. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).	263
Figura A-1.15. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).	264
Figura A-1.16. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	264
Figura A-1.17. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=135s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	265
Figura A-1.18. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 2 circuitos. .	265
Figura A-1.19. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	266
Figura A-1.20. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	266
Figura A-1.21. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	267
Figura A-1.22. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).	267
Figura A-1.23. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).	268
Figura A-1.24. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	268
Figura A-1.25. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=135s$ y una amplitud del 65% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	269
Figura A-1.26. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 4 circuitos. .	269

Figura A-1.27. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 270

Figura A-1.28. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 270

Figura A-1.29. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R). 271

Figura A-1.30. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 271

Figura A-1.31. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R). 272

Figura A-1.32. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R). 272

Figura A-1.33. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 4 circuitos, con modificación de la geometría en los cambios de sección incorporando formas curvas (izquierda) y elementos disipadores de energía (derecha). 273

Figura A-1.34. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas. 273

Figura A-1.35. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R). 274

Figura A-1.36. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas. 274

Figura A-1.37. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas. 275

Figura A-1.38. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección,

ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	275
Figura A-1.39. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	276
Figura A-1.40. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	276
Figura A-1.41. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	277
Figura A-1.42. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	277
Figura A-1.43. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 6 circuitos. .	278
Figura A-1.44. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	278
Figura A-1.45. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	279
Figura A-1.46. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	279
Figura A-1.47. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	280
Figura A-1.48. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).	280
Figura A-1.49. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.	281

Figura A-1.50. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas..... 281

Figura A-1.51. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante REF..... 282

Figura A-1.52. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 2 circuitos disipativos..... 282

Figura A-1.53. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos..... 283

Figura A-1.54. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 6 circuitos disipativos..... 283

Figura A-1.55. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos incluyendo paredes curvas en los cambios de dirección en los circuitos. 284

Figura A-1.56. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos incluyendo paredes curvas en los cambios de dirección y resaltos para provocar mayor disipación de energía en los circuitos. 284

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla II.1. Clasificación de ondas en función del periodo.....	45
Tabla II.2. Oscilaciones resonantes máximas en distintas áreas geográficas (adaptado de Rabinovich, 2009)	49
Tabla II.3. Valores en la literatura para la estimación de la altura de la onda de infragravedad.....	55
Tabla II.4. Modos de oscilación en dársenas unidimensionales rectangulares con profundidad constante (adaptado de Wilson, 1972).....	63
Tabla II.5. Modos de oscilación en dársenas bidimensionales rectangulares y circulares con profundidad constante (adaptado de Wilson, 1972).....	65
Tabla II.6. Modos de oscilación en dársenas unidimensionales rectangulares con un extremo abierto (adaptado de Wilson, 1972).....	75
Tabla II.7. Impedancias para algunas dársenas con fondo constante (Palomino, 2001)	78
Tabla II.8. Periodos de onda larga medidos en estudios de resonancia de puertos y bahía.	88
Tabla III.1. Valores aproximados de los coeficientes de reflexión para oleaje (Goda, 2010)	96
Tabla III.2. Tipos de rotura en función del número de Iribarren (Sunamura y Okazuki, 1991)	97
Tabla III.3. Valores de B/L_1 y d_1/d para la reflexión mínima	110
Tabla III.4. Comparación de las estructuras ARJ con 1 y 2 cámaras. Sentido de la variación del coeficiente de reflexión con 1 o 2 cámaras, respectivamente.....	113
Tabla III.5. Comparación de las estructuras ARJ con y sin cubierta.	115
Tabla III.6. Coeficientes de reflexión para paneles dentados y serrados verticales (Neelami y Sandhya, 2003).	124
Tabla IV.1. Estimación de la eficiencia de las estructuras ARJ-R.....	157
Tabla IV.2. Estimación de la eficiencia de las estructuras ARJ-R.....	158
Tabla IV.3. Características de la distribución de circuitos en las estructuras ARJ-R	159
Tabla V.1. Escala de modelo por limitaciones geométricas.	185

Tabla V.2. Escala de modelo por efectos de escala para modelos ARJ-R-CI y ARJ-R-CU, de celdas circulares y cuadradas, respectivamente.	185
Tabla V.3. Matriz de ensayos.	188
Tabla V.4. Identificación de los modos resonantes en los ensayos SRR.	202
Tabla V.5. t_{50} (en segundos) de los ensayos SRR.	207
Tabla V.6. Módulo de disipación $2 \cdot \beta_T$ de los ensayos SRR.	207
Tabla V.7. Energía disipada en una oscilación $2 \cdot \beta \cdot T$ de los ensayos SRR.	208
Tabla V.8. Energía disipada en una oscilación $\Omega=2 \cdot \beta \cdot T$ de los ensayos SRR en el circuito equivalente de las estructuras ARJ-R.	210
Tabla V.9. Estimación visual de la longitud efectiva de circuito (en rojo $Be_c < B_c$).	211
Tabla V.10. Obtención del coeficiente de reflexión para los diseños óptimos de estructuras ARJ-R para $T[s]=45, 90$ y 135	218
Tabla A-1.1. Nomenclatura de los ensayos.	251
Tabla A-1.2. Periodos resonantes registrados en los sensores 3, 5, 9 y 11, para ensayos SRR mediante análisis espectral.	252

NOTACIÓN

Símbolos:

α [-]	= parámetro
β [s ⁻¹]	= tasa de amortiguación, término de disipación
χ [-]	= $H_{\text{ref}}/H_{\text{inc}}$ = coeficiente de reflexión
γ [-]	= parámetro
η [-]	= fricción viscosa
δ [-]	= espesor pared estructura
ε [-]	= porosidad
η [m]	= elevación de la superficie libre del agua respecto de reposo, desplazamiento vertical de las partículas de agua
φ [rad]	= ángulo de desfase de la onda reflejada
φ_0 [rad]	= ángulo de desfase del modo propio o natural
φ_{ext} [rad]	= ángulo de desfase de la acción exterior
φ_r [rad]	= ángulo de desfase de la acción exterior
λ_1 [-] y λ_2 [-]	= $\begin{cases} -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \\ -\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \end{cases}$ = coeficiente exponencial de la solución de la elongación del resorte
ν [m ² /s]	= viscosidad cinemática del fluido
ρ [T/m ³]	= densidad = relación entre la masa y el volumen
ϱ [-]	= relación de aspecto de la dársena rectangular
τ [N·m ⁻²]	= tensión debida a la fricción
ω [s ⁻¹]	= $2 \cdot \pi / T$ = frecuencia angular del movimiento armónico
ω_0 [s ⁻¹]	= frecuencia angular del modo propio
ω_{ext} [s ⁻¹]	= frecuencia angular de la fuerza exterior
ξ [m]	= desplazamiento horizontal
ϑ [-]	= ancho relativo de la bocana
Λ [s ⁻¹]	= $2 \cdot \beta$ = módulo de disipación en el tiempo
Ω [-]	= $2 \cdot \beta \cdot T$ = módulo de disipación en una oscilación completa

Letras minúsculas:

a [m]	= ancho de la bocana
b [m]	= ancho dársena
c [m/s]	= L / T = celeridad onda
d [m]	= profundidad
d_{est} [m]	= altura de la estructura
d_1 [m]	= altura de la columna de agua sobre la estructura
d_2 [m]	= altura de la columna de agua bajo la estructura
e_L [-]	= L_{mod}/L_{prot} =escala geométrica
e_{Cfr} [-]	= $C_{fr,mod}/C_{fr,prot}$ = escala del coeficiente de fricción
f [-]	= coeficiente lineal de resistencia porosa
f_{sis} [Hz]	= frecuencia de oscilación del sistema
f_{ext} [Hz]	= frecuencia de la fuerza exterior
g [m/s ²]	= aceleración de la gravedad terrestre = 9.81
$i\sim(t)$ [A]	= intensidad de corriente eléctrica (en función del tiempo t)
j [-]	= $\sqrt{-1}$ = unidad imaginaria
k [m ⁻¹]	= $2 \cdot \pi / L$ = número de onda
k_{\perp} [m ⁻¹]	= número de onda perpendicular a la estructura con oleaje oblicuo = $2 \cdot \pi \cdot \cos \theta / L$
l [m]	= longitud de dársena portuaria o masa de agua confinada
l_x [m]	= longitud de dársena portuaria o masa de agua confinada en el sentido del eje x , o longitudinalmente
l_y [m]	= longitud de dársena portuaria o masa de agua confinada en el sentido del eje y , o transversalmente
l_s [m]	= longitud característica
m, n, p, q [-]	= número entero
n [-]	= número de celdas en una estructura ARJ-R
s [-]	= coeficiente de inercia que engloba los efectos inerciales en una pared porosa
t [s]	= tiempo
u [m/s]	= velocidad horizontal
u_{max} [m/s]	= velocidad horizontal máxima

v^* [m/s]	= velocidad característica para la determinación de R_e o F_r .
v [m/s]	= velocidad vertical
v_s [m/s]	= velocidad característica
v_- [V]	= diferencia de potencial
v_{-c} [V]	= diferencia de potencial medido en bornes de condensador
x [m]	= distancia medida en el sentido del eje X
x_m [m]	= elongación del resorte
x_{m,no_Ext} [m]	= elongación del resorte cuando no actúa fuerza exterior
$x_{m,Ext}$ [m]	= elongación del resorte cuando actúa fuerza exterior
z [S/m]	= conductividad

Letras mayúsculas:

A [-]	= factor de amplificación = cociente entre el desplazamiento total y el de excitación = cociente entre la mitad de la amplitud en el paramento reflejante respecto de la amplitud en la bocana
A_i [-]	= constantes
A_0 [m]	= amplitud del movimiento armónico correspondiente a la oscilación libre
A_{ext} [m]	= amplitud del movimiento armónico correspondiente a la acción exterior
B [m]	= ancho de cámara antirreflejante
Be_c [m]	= longitud efectiva de circuito
B_{est} [m]	= ancho de la estructura
B_{rel} [-]	= B/L = ancho relativo de la cámara antirreflejante
C_- [F]	= capacidad eléctrica
C_d [-]	= Coeficiente de disipación
C_{fr} [-]	= Coeficiente de fricción
C_m [-]	= Coeficiente de masa añadida
$C_{no\ trans}$ [-]	= Coeficiente de no transmisión
C_r [-]	= módulo del coeficiente de reflexión
C_R [-]	= Coeficiente de reflexión complejo
$C_{R,\theta}$ [-]	= Coeficiente de reflexión complejo para oleaje oblicuo

Índice

\overline{C}_R [-] irregular)	= Coeficiente de reflexión promediado en frecuencias (oleaje irregular)
$C_{R, \text{ real}}$ [-]	= Parte real del coeficiente de reflexión complejo
$C_{R, \text{ imag}}$ [-]	= Parte imaginaria del coeficiente de reflexión complejo
C_{trans} [-]	= Coeficiente de transmisión
E [J]	= energía
E_0 [J]	= energía, valor inicial
E_{dis} [J]	= energía disipada
F_{ext} [N]	= amplitud de la fuerza de perturbación exterior
F_i [N]	= Fuerzas de inercia
F_g [N]	= Fuerzas de gravedad
F_{μ} [N]	= Fuerzas viscosas
[Fr] [-]	= $\frac{v^*}{\sqrt{g \cdot L^*}}$ = Número de Froude
G [-]	= factor del efecto de la porosidad de la pared perforada ante el paso de las ondas a su través
H [m]	= altura de la onda
H_{m0} [m]	= $H_{m0} = 4 \cdot \sqrt{m_0}$ = altura de la ola significativa espectral obtenida a partir del momento de orden 0,
H_s [m]	= altura de ola significativa
I_r [.]	= número de Iribarren
K [-]	= constante
K_m [-]	= constante de amortiguación del resorte
KC [-]	= número de Keulegan-Carpenter
L [m]	= longitud de onda
L^*	= longitud característica para obtener Re o F_r
L_0 [m]	= longitud de onda en aguas profundas
L_i [m]	= longitud de onda en el interior de la cámara i
$L_{n=i}$ [m]	= longitud de onda asociada al modo resonante i
L_{\perp} [m]	= $L \cdot \cos\theta$ = longitud de onda perpendicular a la estructura con oleaje oblicuo
L_{\sim} [h]	= Inductancia eléctrica

M [kg]	= masa
N [-]	= número de circuitos disipativos en una estructura ARJ-R
Pfr [w]	= potencia disipada por fricción
Q [-]	= factor de disipación, Q-factor
Q _φ [-]	= parámetro de apuntamiento espectral
R- [Ω]	= Resistencia eléctrica
Re [-]	= número de Reynolds
S [m ²]	= superficie.
T [s]	= periodo de la onda monocromática
T _i [s]	= periodo natural de oscilación, propio de la masa de agua i=0. 1. 2...)
T _p [s]	= 1/f _p = periodo pico del oleaje
Ur [-]	= número de Ursell = H·L ² /d ³
V~ [v]	= amplitud de la diferencia de potencial eléctrico
Z-(t) [Ω]	= impedancia (en función del tiempo)

Subíndices y superíndices:

c	= de circuito
cel	= de celda
inc	= incidente
mod	= modelo
prot	= prototipo
ref	= reflejado
trans	= transmitida
CI	= de celda circular
CU	= de calda cuadrada
IG	= de la banda de infragravedad
T	= asociado a los ensayos SRR sin modificar
*	= asociado a los ensayos SRR eliminando el efecto de la dársena-canal
+	= óptimo (en optimización de circuitos y estructuras ARJ-R)

Acrónimos:

2D	= 2 dimensiones
3D	= 3 dimensiones
ARJ	= estructura marítima antirreflejante tipo Jarlan.
ARJ-R	= estructura ARJ de circuitos disipativos largos para la atenuación de la resonancia en puertos
CADIMA	= proyecto de investigación de título “ <i>Diseño y adaptabilidad de cajoneros convencionales para la construcción de diques y muelles antirreflejantes</i> ” (2008-2011)
cyes	= Construcciones y Estudios S. A., empresa constructora.
LPC	= Laboratorio de Puertos y Costas de la UPV
MESRR	= metodología experimental de simulación de la respuesta resonante
MUCAR	= proyecto de investigación de título “ <i>Estudio de muelles de cajones antirreflejantes</i> ” (2008-2010)
MUDIVAR	= proyecto de investigación de título “ <i>Estudio de muelles y diques verticales antirreflejantes</i> ” (2002-2005)
NMM	= Nivel medio del mar
REDIVAR	= proyecto de investigación de título “ <i>Estudio del rebase y la estabilidad de diques verticales antirreflejantes</i> ” (2007-2009)
SRR	= simulación de respuesta resonante
REF	= sección completamente reflejante, referencia de disipación en los ensayos realizados
RLC	= circuito eléctrico formado por una resistencia (R), una inductancia (L) y un condensador (C), en serie.
SWL	= Nivel del agua en reposo
UPV	= Universitat Politècnica de València

CAPÍTULO I

Introducción

*"Un port est un séjour charmant pour une âme fatiguée des luttes de la vie.
L'ampleur du ciel, l'architecture mobile des nuages,
les colorations changeantes de la mer, le scintillement des phares,
sont un prisme merveilleusement propre à amuser les yeux sans jamais les lasser.
Les formes élancées des navires, au gréement compliqué,
auxquels la houle imprime des oscillations harmonieuses,
servent à entretenir dans l'âme le goût du rythme et de la beauté.
Et puis, surtout, il y a une sorte de plaisir mystérieux et aristocratique
pour celui qui n'a plus ni curiosité ni ambition, à contempler,
couché dans le belvédère ou accoudé sur le môle,
tous ces mouvements de ceux qui partent et de ceux qui reviennent,
de ceux qui ont encore la force de vouloir, le désir de voyager ou de s'enrichir."
Baudelaire, C. (1917) Le port. Petits Poèmes en prose
(Le Spleen de Paris). Louis Conard. Ed. Paris ; pp141-142*

*Un puerto es un lugar encantador para el alma fatigada de las luchas de la vida.
La amplitud del cielo, la cambiante arquitectura de las nubes,
las cambiantes tonalidades del mar, el centelleo de los faros,
son un prisma maravillosamente apropiado para distraer la vista, sin cansarla jamás.
Las formas esbeltas de los navíos, de complicado aparejo,
a los que el oleaje imprime oscilaciones armoniosas,
sirven para mantener en el alma el gusto por el ritmo y a la belleza.
Y además, y sobre todo, para el que no tiene ya ni curiosidad ni ambición,
hay una especie de placer misterioso y aristocrático en contemplar,
tendido en un mirador o apoyado en el muelle,
toda esa agitación de los que parten y de los que regresan,
de los que tienen aún fuerzas para querer, deseos de enriquecerse o de viajar.
(Traducción libre del autor)*

I.1. Motivación de la investigación.

La fuerte tendencia de crecimiento del comercio internacional provocada por el proceso de globalización y la interconexión entre los centros de producción y consumo ejerce una gran presión sobre los puertos como infraestructura principal en el transporte de mercancías. La evolución de los puertos para hacer frente a la creciente demanda de la capacidad de manipulación de mercancías, unida a otras necesidades como la incorporación de espacios portuarios para cruceros, embarcaciones de recreo, etc., conduce a una continua modificación y expansión de las dársenas portuarias en numerosos puertos.

Un puerto configura un área marítima abrigada parcialmente del oleaje y conectada con el mar a través de la bocana, abertura necesaria para la entrada de embarcaciones. Los cambios en la geometría, tipología y calados en las dársenas portuarias pueden modificar las condiciones de agitación y características resonantes. La resonancia tiene efectos no deseables para la seguridad y las operaciones portuarias, como la amplificación de las oscilaciones en el interior del puerto y las corrientes que pueden producir movimientos excesivos e incontrolados de los buques. Las consecuencias de estos movimientos van desde el cierre del puerto y la parada de las operaciones de carga y descarga a los daños en las líneas de amarre, en las defensas, en la carga y en las propias embarcaciones.

El estudio de la respuesta de las dársenas portuarias frente al oleaje, y específicamente de la resonancia portuaria, es fundamental para el planeamiento y el diseño de las modificaciones de dársenas existentes o creación de nuevas. Esta importancia está reforzada por el hecho de que, una vez construida la nueva planta del puerto, suele ser muy difícil y costoso cambiar la respuesta del mismo frente al oleaje y las ondas largas (Lee et al, 1998; Mid West Port Authority, 2014).

En general, las obras de abrigo protegen las actividades portuarias de los oleajes ($T_p[s] < 30$) exteriores, pudiendo penetrar por la bocana, directamente o por difracción en las obras de abrigo¹. Pese a ello, los procesos en los que sucesivas reflexiones provocadas por los cambios de profundidad en la batimetría interior del puerto y/o en los contornos que definen las obras de atraque y amarre² pueden provocar casos en los que la operatividad portuaria se ve comprometida por una agitación excesiva³.

En estos casos asociados a agitación portuaria provocada por oleaje, las soluciones pueden intentar reducir la entrada de energía al puerto mediante prolongación de las obras de abrigo, cuencos resonantes en el canal de entrada al puerto, etc. o reducir la reflexión mediante estructuras que disipen la energía del oleaje y por lo

¹ Otros mecanismos como la transmisión a través de las estructuras o el rebase masivo no se considera por ser generalmente poco relevante, salvo casos excepcionales.

² Generalmente paramentos verticales muy reflejantes.

³ según los límites operativos que dependen de la funcionalidad asignada al puerto o a la dársena portuaria.

tanto reduciendo la reflexión una vez ha penetrado en el puerto, con playas, taludes de escollera o estructuras antirreflejantes específicamente diseñadas al efecto (ver Bruun, 1956, 1989).

La tipología de atraque más habitual en el interior de los puertos es, en general, la de muelle vertical y, más concretamente en puertos comerciales, la de cajones, por razones de economía, optimización de espacio, metodología constructiva y funcionalidad. Sin embargo, las estructuras marítimas verticales reflejan la práctica totalidad de la energía del oleaje que incide sobre el muelle empeorando las condiciones de operatividad en las dársenas. Una posible solución para mejorar la respuesta de dársenas con problemas de agitación sin modificar la geometría de la dársena o puerto consistiría en reemplazar los muelles verticales clásicos, altamente reflejantes, por alguno de los numerosos diseños de muelles de baja reflectividad frente a oleaje existentes. Estos diseños se basan, generalmente, en la existencia de cámaras huecas interiores que permiten la entrada de agua a las mismas a través de huecos en la pared frontal del muelle, siendo la de Jarlan (1961) la solución más sencilla.

La disipación de energía en las estructuras tipo Jarlan se produce mediante procesos puramente hidráulicos y de interacción oleaje/estructura. La disipación de energía se produce a través de la turbulencia e interferencia de fase mientras que la interacción ola-estructura tiene lugar en el seno del flujo de agua junto a los contornos de la estructura, por fricción, amortiguamiento viscoso y formación de chorros.

La mayor efectividad antirreflejante, para las estructuras tipo Jarlan, se alcanza cuando la anchura de la cámara es aproximadamente la cuarta parte de la longitud de onda en la cámara, o un múltiplo impar de esa distancia. En ese caso, el oleaje reflejado, al salir al exterior por el panel perforado frontal de la estructura se encontrará con el oleaje incidente en situación de oposición de fase. Asimismo, la disipación de energía turbulenta-viscosa también es máxima al ser máxima la velocidad inducida por el oleaje en la pared perforada.⁴

Sin embargo, las ondas largas ($T_p[s] > 30$), penetran fácilmente en los puertos produciendo oscilaciones de la masa de agua confinada en el interior de los mismos. Los fenómenos de oscilaciones en masas de agua han sido estudiados desde principios del siglo XIX, comprendiendo tanto las oscilaciones libres como forzadas en dársenas cerradas o semicerradas con batimetría regular o irregular (Raichlen y Lee, 1992). Existen soluciones teóricas exactas aplicables a dársenas de forma regular, así como aproximaciones numéricas para otras geometrías de dársenas y sistemas de medición en prototipo para la obtención de la respuesta resonante del puerto o dársena.

⁴ La mayor diferencia de niveles provocada por la diferencia de fases es la responsable de la que las velocidades sean máximas por transformación de la energía potencial en cinética en el panel perforado.

La resonancia se produce si el periodo de la onda larga coincide con alguno de los periodos naturales de oscilación de las dársenas. El fenómeno de resonancia genera mayores amplitudes de oscilación causando movimientos de la masa de agua no deseables: amplificaciones de movimientos verticales que afectan a la carga/descarga y movimientos horizontales⁵. Además de la pérdida de operatividad que conllevan, pueden tener efectos negativos en la seguridad al provocar accidentes por rotura de amarras de buques atracados así como daños en defensas y embarcaciones por impactos de las embarcaciones con las estructuras de atraque y amarre así como entre embarcaciones (MCComb et al, 2005; Van der Molen et al, 2006; Rabinovich, 2009; y Uzaki et al, 2010).

En puertos comerciales en los que la eslora de los buques es del orden de cien metros y sus periodos de oscilación pueden ser similares a los periodos naturales de la dársena, los problemas pueden ser mayores al entrar en resonancia no sólo la masa de agua, sino el propio buque y con ella los sistemas de amarres. Los modos naturales de estos puertos se encuentran en el rango de las ondas de infragravedad⁶ ($30 < T_p[s] < 300$ y $0.1 < L[km] < 10$ km) citándose como ejemplos referenciados extensamente en la literatura científica los puertos de Sines en Portugal (Gierlevsen et al, 2001), Long Beach en California (Kofoed-Hansen et al, 2005), y Hualian en Taiwan (Chen et al, 2004).

Afortunadamente, la resonancia en puertos no es frecuente, aunque la espectacularidad de sus efectos junto con la complejidad y alto coste de las medidas correctoras (que generalmente incluyen modificaciones en la geometría del propio puerto o dársena) hacen necesario evitarlos. Como medidas paliativas se han realizado mejoras en los sistemas de amarre, prolongación de los diques de abrigo, establecimiento de sistemas de aviso para embarcaciones y de sistemas de absorción para ondas de largo periodo (Diaz-Hernandez et al, 2016).

Los escasos sistemas de absorción de ondas de largo periodo propuestos en la literatura consisten, básicamente, en estructuras porosas de escollera o bloques de hormigón. La necesidad de espacio requerida por estos sistemas para la absorción de la onda larga⁷ reduce el espejo de agua disponible en la dársena, obstaculizando la navegación y, por lo tanto, eliminando las principales ventajas de la tipología vertical de muelle. La posibilidad de incorporación de dichos sistemas a puertos con problemas de resonancia es poco recomendable con carácter general, dada la creciente demanda del limitado espacio marítimo existente en los puertos.

La posibilidad de adaptación de las estructuras antirreflejantes tipo Jarlan, utilizadas para la absorción de oleaje ($T_p[s] < 30$), a la atenuación de ondas de

⁵ Los movimientos horizontales son varios órdenes de magnitud superiores a los verticales, y por lo tanto, más peligrosos para las embarcaciones, en general.

⁶ La propuesta de clasificación de las ondas del mar en función de su periodo (Munk, 1950) se lleva a cabo idénticos rangos a los asociados al espectro de ondas electromagnéticas.

⁷ Como consecuencia de que el esquema de absorción que utilizan es principalmente unidireccional, relacionado con la longitud de onda.

infragravedad ($30 < T[s] < 300$), requerirían de un ancho de cámara excesivo para su aplicación en muelles convencionales de cajones, además de ser necesaria la determinación de su eficiencia. 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. Suponiendo que este resultado es aplicable también a ondas de baja frecuencia, el diseño correspondiente conllevaría la necesidad de reservar mucho espacio para la zona antirreflejante generando elevados costes de construcción (González-Escrivá y Medina, 2012).

La presente Tesis Doctoral plantea la extensión de las tipologías de muelles verticales de cajones con cámaras huecas para la atenuación de ondas de infragravedad, susceptibles de provocar problemas de resonancia en puertos y dársenas portuarias.

1.2. Objetivos.

Ante la dificultad de resolver los problemas que la resonancia provoca en puertos y dársenas, la presente Tesis Doctoral estudia la posibilidad de aplicación de soluciones antirreflejantes basadas en la tipología Jarlan, extendiéndola a los rangos de periodos asociados a las ondas de infragravedad, resolviendo la problemática de necesidad de espacio marítimo adicional para la absorción de la onda larga, implícita en los sistemas de absorción existentes y en la tipología Jarlan original.

Los objetivos de la investigación se corresponderán con la búsqueda de soluciones a los problemas encontrados:

- a) *Carencia* de estructuras marítimas que combinen la funcionalidad disipativa para condiciones resonantes en el interior de los puertos con la funcionalidad operativa de atraque.
- b) *Incertidumbre* en la estimación de la efectividad de las estructuras marítimas para la atenuación de la resonancia en dársenas portuarias.
- c) *Ausencia* de criterios de diseño óptimo para las nuevas estructuras marítimas antirreflejantes para la atenuación de la resonancia en puertos.

Estableciendo como hitos concretos:

1. Definición del concepto de *circuito antirreflejante*⁸ que permite la extensión de la efectividad del mecanismo empleado en las estructuras antirreflejantes Jarlan (ARJ) mediante la incorporación de *circuitos disipativos largos*, para la atenuación de ondas de infragravedad, compatibilizando la funcionalidad disipativa con la correspondiente a una obra de atraque.
2. Desarrollo de una *Metodología Experimental de Simulación de Respuesta Resonante (MESRR)*, específica para la modelización física a escala reducida de las estructuras antirreflejantes expuestas a ondas de infragravedad,

⁸ Patente europea EP2504496B1 (Medina et al, 2016).

reduciendo la problemática e incertidumbre de las metodologías de ondas cortas.

3. Elaboración de una *metodología de análisis de los resultados experimentales de simulación de respuesta resonante (SRR)* que permita la evaluación de la efectividad de las estructuras antirreflejantes en la atenuación de la resonancia en dársenas, incluyendo:
 - a. La separación del efecto disipativo de la dársena del correspondiente exclusivamente a la estructura antirreflejante.
 - b. La comparación de la efectividad entre estructuras analizadas con las metodologías desarrolladas en la presente investigación y cualquier otra definida por su coeficiente de reflexión⁹.
 - c. la obtención de la longitud óptima de circuito disipativo con lo que puede compararse la eficiencia de la estructura analizada con el óptimo para las condiciones de resonancia deseadas.
4. Definición del concepto de *longitud efectiva de circuito* para la optimización del diseño de estructuras ARJ-R.
5. Definición de un *modelo teórico-empírico para el diseño óptimo de estructuras ARJ para la atenuación de resonancia (ARJ-R) en puertos*.

I.3. Estructura de la tesis.

Esta tesis se desarrolla en 6 capítulos que en los que se plantea, argumenta y resuelve la problemática de la atenuación de la resonancia en puertos:

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN. *Se señala la motivación, y se establecen los objetivos y estructura de la tesis.*

Capítulo 2. LA RESONANCIA PORTUARIA. *Se presenta el problema de la resonancia portuaria como elemento motivador de la tesis, sus causas y modelos.*

Se describe el fenómeno de la resonancia extendido a puertos y otras masas de agua confinadas, identificando los distintos mecanismos que pueden provocar la aparición de las ondas largas asociadas a la excitación de los modos naturales de oscilación de puertos y dársenas, embarcaciones y sistemas de amarre. A continuación se exponen los métodos analíticos habitualmente empleados para la identificación de la respuesta resonante de dársenas abiertas y cerradas con geometrías sencillas, analizándose el efecto de la variación del fondo, anchura de la dársena y tamaño y ubicación relativa de la bocana. Seguidamente se

⁹ Para la comparación con los coeficientes de reflexión obtenidos mediante otras metodologías debe tenerse en cuenta:

- no es posible aislar la absorción de la estructura, incluyendo en la capacidad antirreflejante el efecto disipativo de la fricción en los contornos del canal de ensayos y la disipación interna en el fluido.
- La incertidumbre asociada al empleo de métodos de separación de oleaje incidente y reflejado con ondas largas.

presentan los aspectos más relevantes en la experimentación física y numérica para la estimación de la respuesta resonante de puertos y dársenas de geometrías complejas como los existentes en la actualidad, donde la existencia de dársenas interconectadas, de muy distintos y variables calados, hacen muy difícil predecir analíticamente la frecuencia y forma de acoplamiento. El análisis numérico plantea la simulación de la rugosidad y disipación de energía radiada al exterior para una mayor aproximación a los valores reales en la identificación de las frecuencias naturales del puerto, quedando por determinar la probabilidad de presentación de las frecuencias analizadas. Para solventar esta indeterminación pueden incorporarse modelos no lineales de interacción de oleaje para la simulación de la generación de ondas de infragravedad. La experimentación física se basa fundamentalmente en modelos a escala reducida tridimensionales representando la geometría del puerto en su conjunto y expuesto a diferentes rangos de periodos y direcciones, con la problemática asociada a la generación de onda larga y las técnicas aplicadas de separación de oleaje incidente y reflejado. Por último se hace referencia al estudio de casos de puertos con problemas de resonancia descritos en la literatura en los que se han llevado a cabo campañas de medición de onda larga para la determinación de las condiciones resonantes a escala real.

Capítulo 3. ESTRUCTURAS ANTIRREFLEJANTES. *Se analizan y clasifican los distintos sistemas antirreflejantes tanto para oleaje como para onda larga, así como los mecanismos de atenuación de la reflexión.* Se efectúa un recorrido por los principales resultados en relación a la efectividad antirreflejante de cada sistema obtenido por modelos empíricos, analíticos, numéricos o mediante la experimentación física a escala así como de las aplicaciones técnicas que se han llevado a cabo. Se profundiza en el análisis con la crítica a los sistemas antirreflejantes para la atenuación de ondas de largo periodo existentes, así como las metodologías para la estimación de la efectividad de los mismos, para concluir con la tesis en que se plantea la extensión de la funcionalidad de la tipología vertical Jarlan con cámaras huecas (ARJ) para la atenuación de ondas de infragravedad.

Capítulo 4. ESTRUCTURAS MARÍTIMAS VERTICALES DE MÚLTIPLES CÁMARAS UNITARIAS PARA LA ATENUACIÓN DE LA REFLEXIÓN (ARJ-R). Se presenta y resuelve el primer problema que se plantea en la tesis: cómo conseguir la extensión de la efectividad del mecanismo de atenuación de oleaje descrito en el *Capítulo 3*, para las estructuras ARJ, a ondas de infragravedad sin incrementar las dimensiones habituales de los cajones habitualmente utilizados; De ese modo puede incluirse el diseño antirreflejante en una estructura convencional para la conformación de un muelle con tipología vertical. Se define el concepto de circuito

antirreflejante y se compendia en la patente EP 2 504 496 B1 (Medina y otros, 2016), describiendo el diseño de estructuras marítimas ARJ para la atenuación de ondas de infragravedad, en función de las características de las ondas largas a atenuar.

Capítulo 5. EFICIENCIA DE LAS ESTRUCTURAS ARJ-R: ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y OPTIMIZACIÓN. *Donde se investiga cómo evaluar la invención a escala reducida y cómo mejorarla.* La escasa experiencia existente y la complejidad del fenómeno que produce la disipación de energía hacen necesaria la modelización física a escala reducida para la obtención de las propiedades antirreflejantes del muelle. Se estudian las posibles causas de incertidumbre en la modelización física a escala de estructuras antirreflejantes con onda larga para definir una nueva metodología experimental con menores hipótesis, reduciendo la incertidumbre. Entre otras causas, se profundiza en el análisis de los experimentos desarrollados a escala 1/11.6 para minimizar los posibles efectos de escala derivados de los fenómenos viscosos en las aberturas del panel frontal y en los circuitos y se discute la aplicación de las técnicas habituales de separación de oleaje incidente y reflejado. Por otra parte, se examinan los registros de video de los ensayos para registrar visualmente los valores de la longitud eficaz de circuito, nuevo concepto definido en la presente tesis que se relaciona con la longitud óptima de circuito.

Se define una técnica específica para el análisis de los resultados experimentales obtenidos con la nueva metodología experimental en la que se define el procedimiento para la estimación de la evolución de la energía de las oscilaciones en el dominio del tiempo y el mecanismo para la interpretación del proceso de amortiguación. El resultado del análisis de los resultados experimentales son los índices de eficiencia disipativa de las estructuras ARJ-R ensayadas, incluyéndose la estimación del coeficiente de reflexión.

Se presentan los resultados experimentales, exponiendo las características de las dos tipologías de circuitos ensayadas. A partir de los resultados experimentales y en base a la metodología propuesta en la presente tesis, se define un modelo de optimización para adaptar el diseño a las condiciones de periodo de la onda larga utilizando el concepto de longitud efectiva del circuito previamente descrito. Finalmente se obtienen los diseños óptimos, exponiendo las conclusiones en términos del coeficiente de reflexión para las estructuras ARJ-R ensayadas.

Capítulo 6. SÍNTESIS Y CONCLUSIONES. *Se efectúa la síntesis con las aportaciones más relevantes de la investigación llevada a cabo para verificar la hipótesis con que se inicia la presente tesis, indicando las posibles*

líneas futuras de investigación en el estudio de las estructuras marítimas antirreflejantes para la atenuación de la resonancia portuaria.

Se completa la documentación con las referencias y anejos en los que se incluyen las publicaciones relevantes del autor y patentes asociadas a la presente investigación.

CAPÍTULO II

La resonancia en puertos

“the rhythmic, rocking motion that water bodies undergo after they have been disturbed and then sway back-and-forth as gravity and friction gradually restore them to the original, undisturbed conditions”

Korgen, 1995

el rítmico balanceo que experimentan las masas de agua una vez han sido agitadas, y así oscilan avanzando y retrocediendo hasta que la gravedad y la fricción las devuelven, gradualmente, a su condición original, imperturbable.

(traducción libre del autor)

Las oscilaciones de una masa de agua confinada en respuesta a una fuerza exterior han sido estudiadas, tanto desde el punto de vista hidráulico como marítimo, desde el siglo XIX¹⁰. La acción exterior puede extinguirse rápidamente o mantenerse después de iniciada la oscilación, desarrollando oscilaciones libres o forzadas que evolucionan en lagos¹¹ y dársenas con distintos grados de conexión con el exterior.

De forma análoga a la oscilación que se produce en un instrumento de cuerda al pulsar o frotar la misma o en un instrumento de viento al forzar la circulación de aire a través de sus conductos¹², las ondas en una dársena o sistema portuario se convierten en ondas estacionarias cuyas características dependen naturalmente de las características geométricas en planta y de la profundidad de la dársena o conjunto de dársenas que constituyen el sistema del puerto¹³.

El fenómeno de resonancia en puertos consiste en la magnificación de las oscilaciones, por reforzamiento de las mismas, al actuar una acción externa con carácter periódico, próximo a la frecuencia natural o libre de oscilación de la dársena o sistema de dársenas. La resonancia en puertos provoca que las oscilaciones de la superficie libre se incrementan significativamente hasta que se alcanzan el equilibrio entre la entrada de energía en el sistema y las pérdidas por fricción, turbulencia, fricción en los contornos y radiación hacia el exterior en la bocana.

Biesel y Le Méhauté (1956) proponen una clasificación de las dársenas desde el punto de vista del análisis de la bidimensional de la resonancia (ver *Figs. II.1 y II.2*). La *Fig. II.1* expone las tipologías básicas en función del grado de abertura: a) cerrada, b) canal alargado con aberturas completas en los extremos, c) dársena rectangular con un extremo completamente abierto, y d) dársena rectangular con un extremo parcialmente abierto.

¹⁰ Incluso antes si tenemos en cuenta los trabajos de Newton en relación a las oscilaciones de un fluido en un tubo con forma de "U". Forel (1895) recoge las descripciones de "les Ouoniques de Christophe Schulthaiss," en relación a la oscilación de la superficie libre en el lago Constance en 1549, y de Darwin (1898) acerca de las oscilaciones en el lago de Génova en 1600 con amplitudes de hasta un metro; así como observaciones en distintos recipientes de uso cotidiano que sin duda preceden cualquier registro. Las referencias científicas datan de los documentos de Merian (1828) y Poisson (1828) y, especialmente, de las observaciones realizadas por Forel del Lago de Génova (Forel 1895, Darwin 1898, Defant 1961).

¹¹ En el caso de lagos o espacios portuarios o dársenas aislados el término que define las oscilaciones periódicas es el de "seiches" que probablemente proviene de la raíz latina *siccus* que significa seco o expuesto a quedarse en seco por el descenso del nivel del agua en su oscilación (Rabinovich, 2009). En la literatura japonesa son típicamente citadas como oscilaciones secundarias de marea.

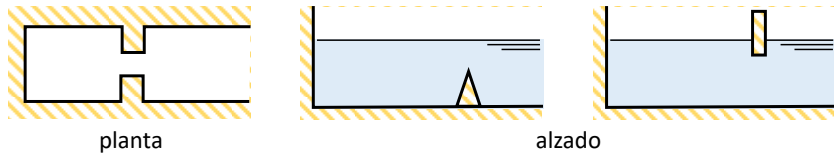
¹² Que pueden estar constituido por tubos con uno (órgano litúrgico) o dos extremos cerrados. En los instrumentos de cuerda, ésta vibra teniendo los dos extremos fijos. En el caso de la mayor parte de los instrumentos de viento convencionales están formados por tubos abiertos.

¹³ Las oscilaciones en dársenas portuarias semicerradas con una o varias conexiones con mar se diferencian de las oscilaciones en masas de agua aisladas en: 1) la generación de las oscilaciones se produce generalmente por ondas largas incidentes que penetran por la bocana, 2) además de la disipación de energía por fricción existe disipación por radiación de energía hacia el exterior a través de la bocana, y 3) la existencia de la resonancia controlada por el modo *Helmholtz* en el que toda la dársena oscila al unisono con todos sus puntos subiendo y bajando a la vez.

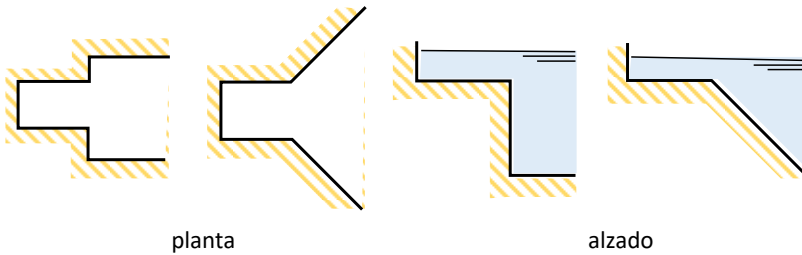


Figura II.1. Tipos de dársenas en función del grado de conexión con el exterior (Biesel y Le Méhauté,1956)

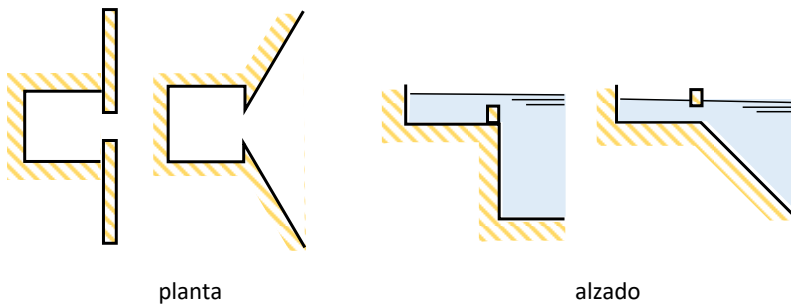
La Fig. II.2 representa las tipologías básicas afectando al fenómeno de resonancia: e) limitación producida por obstáculos, f) limitación por forma geométrica en planta o por variación de calado, y g) combinando los dos anteriores.



e) obstáculos



f) cambios geometría



g) obstáculos y geometría

Figura II.2. Tipología básica de dársenas para el análisis de la resonancia: e) la existencia de obstáculos, f) las variaciones geométricas en planta y alzado, y g) combinación de obstáculos y geometría (Biesel y Le Méhauté,1956)

El periodo de las ondas es el parámetro fundamental que controla la amplificación o atenuación en el interior de las dársenas portuarias¹⁴. Las dársenas y puertos pequeños con longitudes medias del orden de medio kilómetro y profundidades entre 5 y 10 m tienen periodos naturales de oscilación asociados que superan el límite de los 30 s. Las ondas de muy largo periodo, superiores a los 300 s, como *tsunamis*, ondas provocadas por perturbaciones de presión atmosféricas o *meteotsunamis* y ondas internas pueden producir oscilaciones de amplitud relevante¹⁵ unidas a problemas y daños relacionados con las operaciones portuarias únicamente en los puertos de gran tamaño¹⁶. Las ondas de infragravedad, con periodos comprendidos entre 30 y 300 s y longitudes entre 100 m y 10 km, presentan una mayor probabilidad de acoplarse con las frecuencias naturales más habituales de dársenas y puertos.

La resonancia de las ondas largas en los puertos provoca variaciones de nivel y fuertes corrientes¹⁷ que pueden llegar a superar los límites operativos o de seguridad. Pueden producirse colisiones, rotura de amarres y daños en el atraque con la reducción de la seguridad y operatividad portuaria y consiguientes pérdidas económicas¹⁸. Además, si como es habitual, los periodos naturales de oscilación de los buques amarrados son similares a los de la dársena que los alberga, las oscilaciones resonantes pueden ser peligrosas tanto para el buque como para los sistemas de amarre y defensas de atraque¹⁹.

¹⁴ Los periodos o frecuencias naturales de oscilación de lagos y dársenas son independientes del mecanismo que genera la oscilación. Por el contrario, las amplitudes de las oscilaciones dependen fundamentalmente de la energía de la causa externa que las provoca.

¹⁵ Oscilaciones provocada por *tsunamis* (Gilmour, 1990; Hinwood y McLean, 2013), por perturbaciones de presión atmosféricas (Vilibic y Mihanovic, 2003; De Jong y Battjes, 2004; Uzaki et al, 2005; Pattiaratchi y Wijeratne, 2014) y ondas internas (Rabinovich, 2009).

¹⁶ Los periodos dominantes de las oscilaciones producidas por los tsunami medidos en distintas ubicaciones pueden aproximarse a los de las oscilaciones libres de la masa de agua al igual que las provocadas por otras ondas largas, con efectos catastróficos si se produce la resonancia como en Port Albertini en Canadá (Henry y Murty, 1995)

¹⁷ Definidas por Iribarren (1948) con el término "resacas" como aquellas corrientes alternativas de mucho mayor periodo que el oleaje, refiriéndose a la onda de resaca a la onda de las fluctuaciones del nivel medio asociada a las variaciones del oleaje incidente considerada como la causa del "*interesante y temible fenómeno*".

¹⁸ Ver (McComb et al, 2005; Van der Moler et al, 2006; Rabinovich, 2009; Uzaki et al, 2010). Ejemplos de puertos afectados por resonancia provocada por ondas de infragravedad: Puerto de Sines Portugal (Gierlevsenetal., 2001), Puerto de Long Beach California (Kofoid- Hansen et al., 2005), Puerto de Hualian Taiwan (Chen et al., 2004).

¹⁹ La frecuencia natural de oscilación de un sistema de amarre depende del momento de inercia del buque y de las fuerzas restauradoras. La arfada y el cabeceo no son afectados por los esfuerzos de amarre, estando los periodos naturales de oscilación asociados en el rango de unos pocos segundos hasta menos de 20 segundos. El balanceo puede cancelarse con la adecuada elección de amarres y puntos de fijación, aunque de producirse presenta frecuencias similares a los de la alzada y cabeceo. Los movimientos de deriva, avance y retroceso y guiñada (movimientos de componente horizontal) no están afectados por la fuerza restauradora del empuje de Arquímedes, por lo que los periodos de oscilación pueden alcanzar valores desde las decenas de segundos hasta unos pocos minutos, por lo que pueden entrar en resonancia al ser excitados por ondas de infragravedad (Goda, 2010).

El buque aislado también puede entrar en resonancia dependiendo de la dirección del oleaje. Sin embargo, y con carácter general, los periodos naturales de oscilación para buques no amarrados en función de su eslora son:

- Eslora (m) < 6 m ⊗ 2 < T(s) < 3
- 6 < Eslora (m) < 12 ⊗ 3 < T(s) < 5
- 12 < Eslora (m) < 20 ⊗ 5 < T(s) < 7
- Grandes buques ⊗ 20 < T(s)

El problema de la resonancia portuaria provocada por ondas largas, aunque poco frecuente, cuando se produce resulta difícil de corregir o minimizar²⁰. Las medidas propuestas en la literatura científica proponen la modificación de: 1) la planta del puerto²¹, 2) la profundidad del puerto, 3) las características del sistema de amarres, 4) estructuras para la absorción de las oscilaciones, 5) resonadores en el canal de entrada, 6) estructuras porosas o playas expuestas frente a la bocana y 7) sistemas de alerta.

El presente capítulo expondrá en primer lugar los mecanismos de generación de ondas largas que pueden producir fenómenos de resonancia en puertos. En segundo lugar, se analizarán los métodos analíticos y empíricos para el estudio de la resonancia, estimación de los modos naturales de oscilación y factores de amplificación para la comparación entre distintas geometrías. En tercer lugar, se presentarán los procedimientos y modelos numéricos y físicos empleados para mejorar la estimación de los parámetros y respuestas resonantes, extendiendo el análisis a casos con geometría compleja y con carácter transitorio. En cuarto lugar, se hará referencia a las mediciones en prototipo para el estudio de las ondas largas o de la respuesta resonante de los puertos. Finalmente, se expondrán las conclusiones más relevantes para el posterior desarrollo de la presente investigación.

II.1. Mecanismos de generación de las ondas largas asociadas a la resonancia portuaria.

Los periodos naturales de oscilación habituales en los puertos son superiores a los del oleaje, quedando la excitación de dársenas y puertos restringida a las ondas de periodo superior a 30 s. La típica representación del espectro de energía de las ondas del mar atendiendo a su origen (Munk, 1950²²) establece una conveniente primera clasificación de las ondas en función de su periodo²³.

²⁰ Como medidas paliativas que no incluyen modificaciones estructurales se pueden citar las mejoras en los sistemas de amarre y, establecimiento de sistemas de aviso para embarcaciones (Díaz-Hernández, Lara y Losada, 2016). La influencia de los sistemas de amarres, anclaje y defensas en los movimientos de los buques atracados es analizada numéricamente por Havelock (1940), Lean (1971) y Bowers (1975) entre otros, destacando el papel fundamental que las características de los sistemas de amarres tienen en la respuesta del buque a oscilaciones de largo periodo. Como sistema más apropiado Bowers apunta la utilización de los servo sistemas.

²¹ Antes de la 2ª Guerra Mundial el puerto francés de Le Havre presentaba frecuentes y problemáticas oscilaciones que fueron involuntariamente "corregidas" al abrirse una brecha de 20-25 m de ancho en uno de los diques de abrigo por el impacto de un torpedo lanzado por error (Rabinovich, 1993).

²² Según la cita de Munk (1950), se obtiene de la Scripps Institution of Oceanography, New Series No. 531

²³ Munk (1950) remarca que la energía asociada a las ondas largas es comparativamente menor que la correspondiente a las ondas de gravedad o a las mareas, sin embargo sus efectos son muy relevantes. Por ejemplo, la amplificación que tiene lugar en la resonancia portuaria puede resultar problemática incluso con ondas incidentes relativamente poco energéticas.

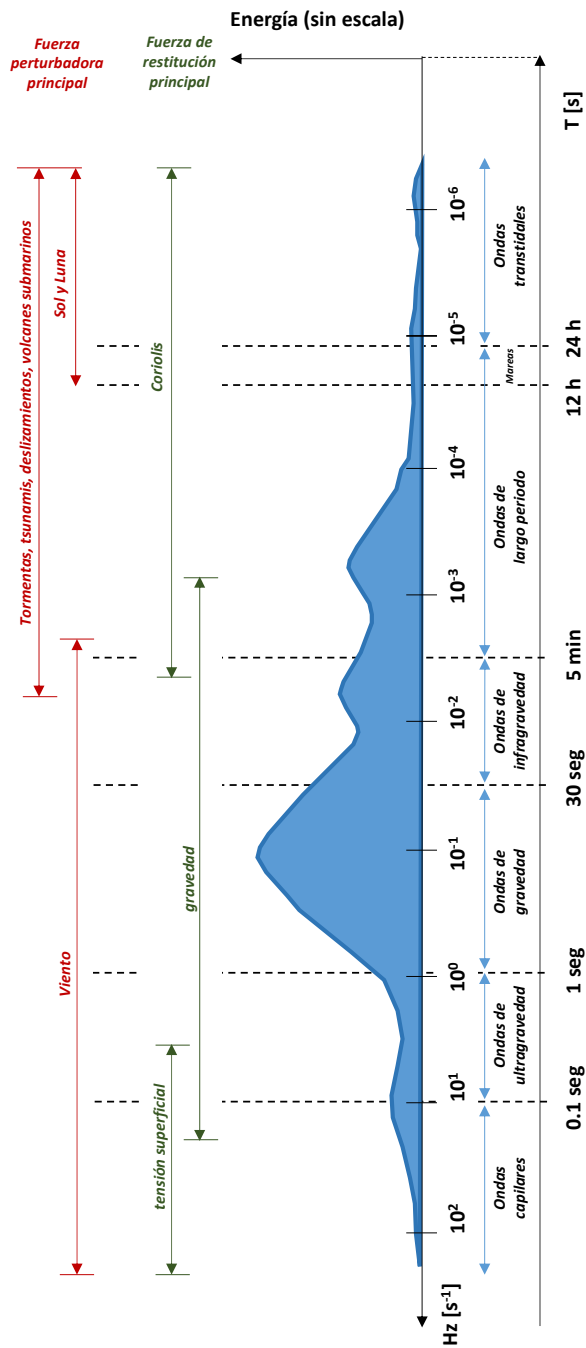


Figura II.3. Espectro de energía de las ondas en el mar (Adaptado de Munk, 1950).

La propuesta establece los siguientes límites:

Tabla II.1. Clasificación de ondas en función del periodo.

Ondas	Rango de periodos	
	<i>min</i>	<i>max</i>
<i>capilares</i>		< 0.1 s
<i>ultragravedad</i>	0.1 s	1 s
<i>ondas de gravedad</i>	1 s	30 s
<i>infragravedad</i>	30 s	300 s
<i>largo periodo</i>	5 min	12 h
<i>mareas ordinarias</i>	12 h	24 h
<i>trans-mareales</i>	> 24 h	

Una segunda posible clasificación siguiendo los criterios de la hidrodinámica clásica simplifica la clasificación anterior al considerar únicamente dos categorías: las ondas cortas y las ondas largas. La teoría de ondas largas considera que la profundidad relativa²⁴ es muy reducida, la componente vertical del movimiento pequeña y la distribución de velocidades en un plano vertical es independiente de la profundidad (Le Méhauté, 1976). Con este planteamiento, las ondas cortas definidas por su periodo propagándose en *profundidades reducidas*²⁵ quedarían enmarcadas *hidrodinámicamente* en la categoría de ondas largas dado que su longitud es grande comparada con la profundidad en la que se propaga.

En tercer lugar, por el mecanismo de generación (ver Fig. II.4), considerando exclusivamente las ondas largas capaces de provocar oscilaciones resonantes en puertos, pueden clasificarse²⁶ en: ondas producidas por 1) actividad sísmica, 2) efectos atmosféricos e 3) interacciones no lineales de ondas cortas.

La resonancia en puertos, a diferencia de la resonancia en lagos o masas de agua aisladas, es un proceso en dos fases incluyendo, en primer lugar, la formación de ondas largas en mar abierto para, en segundo lugar, propagarse hasta la bocana introduciéndose en el puerto. En general, las ondas largas incidentes al puerto presentan un espectro ancho que comprende tanto las frecuencias naturales de oscilación del puerto como otras no resonantes. Las frecuencias no resonantes provocarán oscilaciones forzadas que se amortiguarán rápidamente al cesar el oleaje exterior incidente, mientras que las oscilaciones provocadas por las frecuencias coincidentes con las naturales de las dársenas o puerto en su conjunto perdurarán, disipándose con mucha mayor lentitud. Estas frecuencias resonantes provocarán la oscilación que se amplificará hasta alcanzar el equilibrio con las pérdidas debidas a

²⁴ Se entiende por profundidad relativa la relación d/L siendo d la profundidad y L la longitud de onda.

²⁵ El término *profundidades reducidas*, *aguas someras*, o "shallow water" hace referencia a relaciones de profundidad relativa, d/L inferiores a 1/20.

²⁶ Se omiten en esta clasificación las producidas por ondas internas asociadas a mareas y por fuertes corrientes por ser menos frecuentes.

la fricción, disipación turbulenta, absorción y radiación hacia el exterior a través de la bocana (Okiihiro et al, 1993; Okiihiro y Guza, 1996).

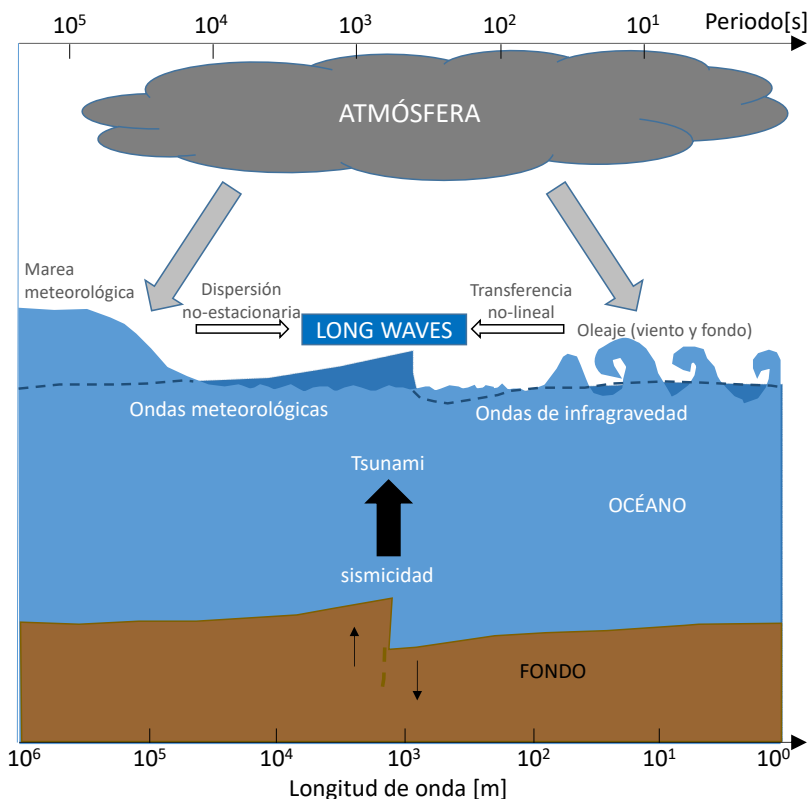


Figura II.4. Mecanismos de generación de onda larga (adaptado de Rabinovich, 2009).

II.1.1. Ondas largas producidas por actividad sísmica.

Los fenómenos de resonancia provocados por actividad sísmica incluyen los desencadenados por: ondas sísmicas terrestres superficiales y por ondas de *tsunami*²⁷ o maremotos.

Si bien, hay evidencias de la generación de oscilaciones resonantes por ondas sísmicas terrestres superficiales en masas de aguas aisladas y conectadas con mar abierto²⁸, el mecanismo de transmisión no se conoce completamente y, además, éstas son poco probables (Rabinovich, 2009).

²⁷ El término *tsunami* en japonés puede traducirse como ola en puerto (Zelt, 1986).

²⁸ En relación al terremoto de Lisboa de 1755 (Wilson, 1972), el de Alaska de 1964 (Donn, 1964; Korgen, 1995)

La actividad sísmica bajo el mar, de gran intensidad y corta duración,²⁹ puede generar ondas de tsunami relacionadas con la generación de oscilaciones resonantes con la mayor capacidad destructiva conocida³⁰ en bahías, ensenadas y puertos (Honda et al., 1908; Munk, 1962; Wilson, 1972; Murty, 1977; Van Dorn, 1984; Mei, 1992; Candella et al, 2008; Rabinovich et al, 2011).

Los *tsunamis* pueden definirse como un tren de ondas largas progresivas generadas por transferencia del movimiento del fondo del mar a la masa de agua. El movimiento se transmite en todas direcciones pudiéndose considerar que a cierta distancia del epicentro el *tsunami* consistirá en una primera onda³¹, seguida por un tren de ondas considerablemente más cortas, y de períodos progresivamente decrecientes (Martín, 2003).

Las longitudes de las ondas de *tsunami* en mar abierto se encuentran, habitualmente, entre los 100 y 400 km. Esta longitud es grande en comparación con los 4 km de profundidad media en el Océano Pacífico³², con lo que la onda se propaga en *profundidades reducidas* a una velocidad $c = \sqrt{g \cdot d}$, donde g es la aceleración de la gravedad y d la profundidad local, del orden de los 700 km/h. Con esas velocidades y puesto que la amplitud del *tsunami* en mar abierto es probablemente inferior a 1 m, éste pasa fácilmente desapercibido a grandes profundidades quedando enmascarado por el oleaje, no constituyendo amenaza alguna para embarcaciones de cualquier tamaño.

Sin embargo, en la propagación de la onda de *tsunami* hacia el talud continental y sobre la plataforma continental, su amplitud se incrementa, disminuyendo asimismo la longitud de onda a medida que se va asomerando. Tras los procesos de refracción, difracción, asomeramiento y reflexión, la onda puede alcanzar la costa con grandes cambios respecto de las características en grandes profundidades.

Las mediciones de las ondas de *tsunami*, por lo general, se registran en las proximidades de la costa. Las condiciones específicas locales/regionales topográficas condicionan las características resonantes y transforman el espectro de los *tsunamis*. Por lo tanto, es habitual que los registros de ondas provocados por terremotos distintos son parecidos en las mismas zonas (Miller, 1972; Lepelletier, 1980; Xing et al., 2010). Pese a la dificultad en la identificación del espectro original del *tsunami* Rabinovich (1997) propone una aproximación para independizarlo del efecto topográfico local.

²⁹ Además de poder ser provocado por terremotos submarinos, los deslizamientos submarinos o las explosiones volcánicas también pueden desencadenar ondas de tsunami.

³⁰ Aunque no muy frecuentes (dependiendo de la región, entre uno cada 12 años hasta uno en 100-200 años) la energía desencadenada es del orden de 10^3 - 10^5 cm² (Rabinovich, 2009).

³¹ En el caso del tsunami de Sumatra en 2004, la mayor parte de la energía estaba asociada a períodos entre 40 y 50 minutos, correspondiendo con las oscilaciones resonantes de mayor intensidad registradas.

³² Profundidades relativas d/L entre 25 y 100, es decir, condición de profundidades reducidas.

II.1.2. Ondas largas producidas por efectos atmosféricos.

La presión atmosférica y su variación provocan cambios en el nivel de las masas de agua en océanos, mares y lagos, así como movimiento de masas de aire. Dependiendo de la duración y de la extensión a la que afectan pueden distinguirse dos fenómenos de onda larga asociados: las mareas meteorológicas (Pugh, 1987) y los *meteotsunamis*³³ (Montserrat, 2006; Rabinovich, 2009 y Llinares, 2016).

A escala regional, los cambios de presión atmosférica de larga duración como el generado por el paso de un ciclón con bajas presiones causan un ascenso del nivel del agua que, combinado con la acción del viento desencadenan mareas meteorológicas que pueden producir inundaciones de los terrenos limítrofes. El caso contrario con presiones atmosféricas elevadas deprime el nivel del agua pudiendo dejar en seco las zonas menos profundas.

Los *meteotsunami* se generan por perturbaciones atmosféricas incluyendo variación de presión atmosférica y viento a menor escala. La altura de las ondas producidas por un *meteotsunami* pueden alcanzar niveles peligrosos en determinadas condiciones (Montserrat et al, 2006).

Aunque poco frecuente, en algunas situaciones la energía de las perturbaciones atmosféricas que se desplazan puede llegar a provocar modificaciones de unos pocos cm en el nivel del agua (Hibiya y Kajiuira, 1982; Orlic, 1980; Rabinovich y Monserrat, 1996; Sepic y Rabinovic, 2014). La onda generada pueden ser ondas libres viajando a la velocidad correspondiente a la de una onda que se propaga en profundidades reducidas, u ondas atrapadas que se propagan a la velocidad determinada por su periodo y por el talud continental (Ursell, 1952). Para que el cambio del nivel del agua sea significativo es necesario que se produzca una amplificación por resonancia en la propagación, que se produce si la perturbación atmosférica se desplaza a la misma velocidad que las ondas de *meteotsunami* generadas³⁴. El efecto de esta resonancia³⁵ no es suficientemente energético para provocar un gran efecto sobre la costa, pero si alcanza una masa de agua semi-cerrada (bahía, fiordo o puerto) puede amplificarse peligrosamente si sus frecuencias coinciden con las resonantes de la masa de agua confinada (Raichlen, 1966; Mei, 1992). La necesaria coincidencia de los anteriores efectos³⁶ es la principal causa por la que los *meteotsunami* son poco frecuentes y limitados e ubicaciones específicas (Rabinovich, 1993).

³³Las ondas de *meteotsunami* presentan los mismos periodos, escalas espaciales, y propiedades físicas que los tsunamis generados por acciones sísmicas provocando un efecto destructivo en la costa similar.

³⁴ Asociada con un valor del número de Froude definido como el cociente entre la velocidad de fase de la perturbación atmosférica dividido entre la velocidad local de la onda de *meteotsunami*, es la denominada condición de resonancia de Proudman para ondas libres (Proudman, 1929) o resonancia de Greenspan para ondas de borde atrapadas (Greenspan, 1956).

³⁵ Oleaje de 30-40 cm (Montserrat, 2006; Rabinovich, 2009)

³⁶ Por este motivo, la dirección y velocidad de la perturbación atmosférica tiene más importancia que el contenido energético de las ondas generadas directamente por la perturbación atmosférica.

La *Tabla II.2* recoge las áreas geográficas en las que se registran oscilaciones de origen meteorológico con cierta regularidad (Rabinovich, 2009), éstas reciben nombres locales como: “*rissaga*”³⁷ en las islas Baleares, “*marubbio*” en Sicilia, “*milghuba*” en Malta, “*abiki*” en la bahía de Nagasaki en Japón, y “*seebär*” en el mar Báltico.

Tabla II.2. Oscilaciones resonantes máximas en distintas áreas geográficas (adaptado de Rabinovich, 2009)

Área geográfica	Nombre local de la onda	Periodo (min)	Altura máxima (m)
Bahía de Nagasaki, Japón	<i>Abiki</i>	35	4.78
Puerto de Pohang, Korea	-	25	> 0.8
Puerto de Longkou, China	-	120	2.93
Puerto de Ciutadella, Menorca, España	<i>Rissaga</i>	10.5	> 4.0
Golfo de Trieste, Italia		200	1.6
Oeste de Sicilia, Italia	<i>Marrubio (Marrobbio)</i>	-15	> 1.5
Malta, Mar Mediterráneo	<i>Milghuba</i>	-20	-1.0
Báltico Oeste, costa finlandesa	<i>Seebär</i>		-2.0
Costa Dálmata, Croacia, Adriático este	-	10-30	~ 6.0
Newfoundland, Canadá		10-40	2.0-3.0
Oeste de Irlanda	<i>Death Waves</i>	?	?
Islas Azores y Madeira, Atlántico este	<i>Inchas, Lavadiads</i>	?	?
Puerto de Rotterdam, Holanda		85-100	> 1.5



Figura II.5. Puerto de Ciutadella (Menorca) en la *rissaga* del 21 de Junio de 1984 (de Rabinovich y Monserrat, 1996).

³⁷ *Rissaga* en lengua catalana significa “dejar en seco”, similar a la palabra *resaca* en lengua castellana.

II.1.3. Ondas largas de infragravedad

Las ondas de infragravedad son ondas largas de gravedad con periodos comprendidos entre 30 y 300 s (Munk, 1950; Kinsman, 1965) y longitudes entre 100 m y 10 km (Rabinovich³⁸, 2009). Las ondas de infragravedad se generan, principalmente mediante mecanismos de interacción no lineal por transferencia de las altas frecuencias del oleaje generado por viento hacia las bajas frecuencias³⁹ (Gallagher, 1971).

Bowen y Huntley (1984) indican que las ondas de infragravedad son las principales responsables del campo de velocidades en las proximidades de la costa por lo que el contenido energético de éstas puede ser importante para los procesos costeros (Herbers et al, 1994 y 1995). Si además tenemos en cuenta que los modos naturales de oscilación de dársenas y embarcaciones en la mayoría de los puertos es del orden de minutos, las ondas de infragravedad pueden considerarse como la principal causa de resonancia en puertos (Rabinovich, 2009).

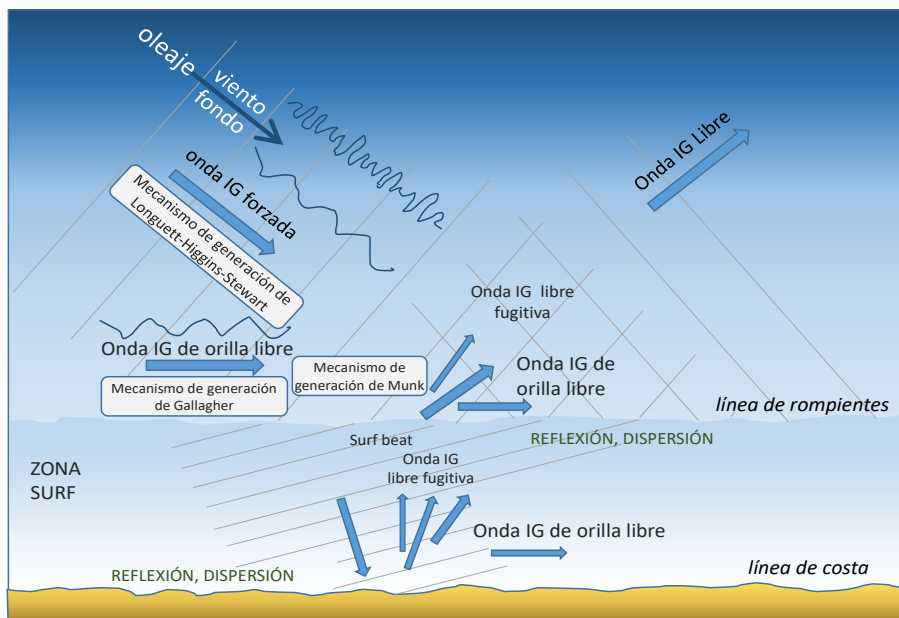


Figura II.6. Principales mecanismos⁴⁰ de generación de las ondas largas de infragravedad en la costa (adaptado de Rabinovich, 2009).

³⁸ Rabinovich (2009) extiende la definición de ondas de infragravedad para ondas de hasta 600 s.

³⁹ Munk (1949) y Tuckler (1950) fueron los primeros en referir la correlación entre el oleaje y ondas largas de relativamente alta frecuencia. Fueron inicialmente denominadas "surf beats" por Munk (1949) y más generalmente ondas de infragravedad después de la propuesta de Kinsman (1965).

⁴⁰ Para mayor detalle en la descripción de los mecanismos de generación de las ondas de infragravedad pueden consultarse los trabajos de Bowen y Huntley (1984) y Battjes (1988).

Las ondas de infragravedad pueden clasificarse atendiendo a sus características de propagación en tres categorías (Martín, 2003): 1) ondas largas forzadas acompañando los grupos de olas viajando en dirección a la costa, 2) ondas largas libres que se propagan a lo largo de la costa o que escapan en dirección a mar abierto y 3) ondas largas estacionarias atrapadas por la topografía de la costa.

II.1.3.1. Ondas forzadas asociadas a grupos de olas

El oleaje que se propaga hacia la costa fuera de la zona de generación tiende a formar paquetes de ondas agrupadas denominadas grupos de olas⁴¹. El agrupamiento, a presión atmosférica constante, provoca una depresión del nivel de agua bajo el paso del grupo y un ascenso entre grupos (Bowers, 1977), a modo de onda, que recibe el nombre de ondas largas de infragravedad ligadas a grupos, o *Bounded Long Wave (BLW)*, debido a su dependencia del grupo de olas.

El primer mecanismo de generación puede explicarse en términos de cambios en el gradiente del tensor de radiación para grupos grandes y pequeños (Longuet-Higgins, 1964). La *BLW* generada se encuentra desfasada 180° respecto del grupo del oleaje incidente, tiene el mismo periodo y viaja con velocidad igual a la del grupo de olas⁴² (Rabinovich, 2009), que es menor que la onda incidente, y aumenta su amplitud al reducirse la profundidad (Medina, 1990).



Figura II.7. Perfil de la *BLW* en el grupo de olas.

El segundo mecanismo de generación de energía de infragravedad, asociado indirectamente a los grupos de olas, es el provocado por la variación del punto de rotura de olas individuales del grupo, generándose de forma análoga, una depresión del nivel de agua con carácter dinámico en el que parte de la energía de baja frecuencia es radiada hacia la costa en forma de onda larga forzada *Break-Point Forced Long Waves (BFLW)* según Symonds (1982).

El tercer mecanismo de generación es el que provoca la generación de ondas largas forzadas progresivas paralelas a costa, denominadas *Ondas de vorticidad* o *cizalla (Shear Forced Waves or Vorticity Waves (SFW))* a partir de inestabilidades tangenciales asociadas a las corrientes longitudinales (Bowen y Holman, 1989).

⁴¹ Un grupo de olas es una serie finita de ondas individuales propagándose en la misma dirección a la velocidad de grupo, en el que la dirección, longitud y altura de las ondas individuales son similares..

⁴² La velocidad del grupo es bastante menos que la velocidad de fase de las olas de idéntica frecuencia.

II.1.3.1. Ondas libres y ondas estacionarias

Las ondas libres presentan características de propagación propia, no ligada al grupo de olas que generan la onda forzada original. Puesto que inicialmente la práctica totalidad de la energía de las ondas de baja frecuencia corresponde a ondas forzadas, la gran mayoría de las ondas largas libres proceden de la liberación de la energía de las ondas forzadas. Las ondas estacionarias pueden formarse por interacción entre las ondas libres entre sí o con otras ondas y el fondo, quedándose atrapadas espacialmente.

Las ondas de infragravedad libres pueden clasificarse en: a) ondas libres radiadas en la línea de rompientes o *surf beat*, b) ondas de orilla progresivas o estacionarias, c) ondas libres provocadas por variación de la posición de la línea de rotura y d) ondas libres de infragravedad por refracción en fondos irregulares.

- Las ondas largas forzadas *BLW* formadas (Longet-Higgins, 1964), ligadas a la modulación del oleaje en grupos se convierten en libres cuando alcanzan la zona de rompientes, radiando una elevación hacia la costa y otra hacia mar adentro con una depresión entre ambas.

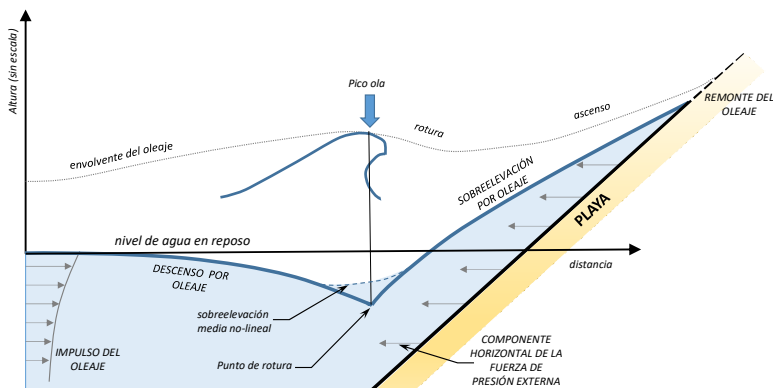


Figura II.8. Efecto de la tensión de radiación en la zona de rotura (adaptado de Le Mèhautè, 1976).

A su vez, las elevaciones dirigidas hacia la costa o *surf beats* son reflejadas en la costa⁴³ propagándose de nuevo hacia el mar (Munk, 1949), conformando una secuencia de elevaciones y depresiones de unos 2-3 minutos de periodo (Tucker, 1950).

⁴³ Longet-Higgins (1966) asume que la onda larga asociada con el transporte de masa experimenta una reflexión parcial mientras que las de menor periodo siguen su propagación hasta su destrucción total en zonas someras. Otro mecanismo alternativo es el propuesto por Bowen que apunta la posibilidad de que la onda sea liberada cuando el tren de ondas experimenta una fuerte difracción o atraviesa una discontinuidad brusca.

La suma de las ondas que se dirigen a la costa y las reflejadas en generarán una onda estacionaria no resonante, que perdurará mientras actúe el elemento generador, disipándose rápidamente al cesar éste (Holman, 1981).

- Las ondas de orilla, o *edge waves*, se caracterizan porque se propagan a lo largo de una playa con sus crestas casi perpendiculares a la línea de costa y con amplitudes máximas en la orilla y exponencialmente decrecientes con la distancia a costa (Huntley, 1976).

Bajo ciertas condiciones, los grupos de olas incidentes pueden forzar la aparición de ondas de orilla (Gallagher, 1971). Fuera de la zona de rompientes el mecanismo de generación está basado en la extensión a tres dimensiones del modelo de Longuet-Higgins y Stewart (1962, 1964)⁴⁴, confirmándose experimental (Bowen y Guza, 1978) y analíticamente (Goda y Mei, 1981) la posibilidad de resonancia de éstas ondas.

En la zona surf, tras reflejarse en la línea de costa se propagan alejándose de la costa pudiendo radiarse hacia mar abierto o quedarse atrapadas en la costa como ondas estacionarias⁴⁵.

- El modelo de Longuet-Higgins y Stewart (1962) supone que la posición de la línea de rotura es fija. Symonds, (1982) plantea que ésta puede variar su posición en función del tiempo por efecto de los grupos de olas cortas, produciéndose la formación de oscilaciones con periodos referidos a los grupos que las originan⁴⁶. List (1992) propone un modelo para unificar los dos mecanismos de generación de ondas largas que se liberan:
 - desde la zona de generación hacia la costa: onda estacionaria producida por la superposición de la onda radiada hacia la costa y su reflexión en la orilla
 - desde la zona de generación hacia mar adentro: donde se superponen dos ondas progresivas radiadas hacia mar adentro, la generada directamente desde la zona de generación y la reflejada en la línea de costa

⁴⁴ Por lo que los *surf beats* que no se propaguen perpendicularmente a la costa pueden ser considerados como ondas de orilla.

⁴⁵ El atrapamiento de las *edges waves* obedece a las leyes de la geometría óptica que explican la refracción de una onda luminosa al atravesar dos medios (*calados*) de distintas características de forma que las ondas que se propagan hacia el mar con ángulos más oblicuos permanecen refractivamente atrapadas convirtiéndose, en ondas estacionarias.

⁴⁶ La teoría de Symonds, (1982) admite que las ondas largas de periodos igual al del grupo y al de sus respectivos armónicos son radiadas fuera de la región forzada en ambas direcciones, hacia el mar y hacia la costa. La energía que alcanza la costa es totalmente reflejada originándose ondas estacionarias atrapadas y ondas que viajan a zonas de mayor profundidad, fuera de la región forzada, como ondas progresivas. Una parte de la energía de baja frecuencia producida en el punto de rotura es radiada hacia la costa en forma de onda larga forzada, *Break-Point Forced Long Waves (BFLW)*, y otra se propaga fuera de la zona surf como onda larga libre *FLW, surf-beat* o *leaky wave* (onda radiada).

La variación del punto de rotura se considera el mecanismo predominante en temporales con ondas cortas peraltadas (Baldock y Huntley, 2002 y Baldock, 2006)

- Liu (1989) demuestra que las ondas libres de infragravedad pueden generarse a partir de la refracción de grupos de olas al propagarse en batimetrías irregulares.

Medina et al (1990) propone una estimación de la altura de onda de infragravedad a partir del análisis de las formas espectrales del oleaje y de la onda larga asociada⁴⁷:

$$H_{m0}^{IG} = k \cdot (H_{m0}^2 \cdot T_p^{0.5}) \cdot Q_p^{0.5} \quad (II.1)$$

donde H_{m0}^{IG} es la altura de ola espectral de la banda de infragravedad, H_{m0} es la altura de onda significativa espectral, T_p es el periodo de pico y Q_p es el parámetro de apuntamiento espectral.

Bowers (1992) obtiene una estimación teórica de la altura de onda de infragravedad a partir de las características del oleaje que la genera⁴⁸, incluyendo el efecto de la profundidad, que para ondas unidireccionales⁴⁹ tiene por expresión:

$$H_s^{IG} \approx 0.074 \cdot \frac{H_s^2 \cdot T_p^2}{d^2} \quad (II.2)$$

Siendo H_s^{IG} es la altura de ola significativa de la banda de infragravedad, H_s es la altura de ola significativa, T_p es el periodo de pico y d la profundidad.

Asimismo, Bowers (1992) analiza empíricamente las ondas de infragravedad registradas en 3 puertos de Reino Unido proponiendo ajustes con diferencias respecto a los coeficientes obtenidos experimentalmente.

Lara et al. (2014) recopila, entre otros, los resultados teóricos de Medina (1990) y experimentales de Vis (1985), Nelson (1988) y Bowers (1992). Díaz (2006) analiza las mediciones para los puertos de Gijón y Lastres, Melito (2007) para el Puerto de Carrara y López et al (2012) para el puerto del Ferrol. Los resultados se han ajustado por los distintos autores para la estimación de la altura de onda de infragravedad con una expresión del tipo:

$$H_s^{IG} = K \cdot \frac{H_s^{A_1} \cdot T_p^{A_2}}{d^{A_3}} \quad (II.3)$$

donde d es la profundidad, y K , A_1 , A_2 , y A_3 son parámetros cuyos valores pueden obtenerse de la *Tabla II.3*.

⁴⁷ No se incluye la profundidad en esta formulación ya que ésta proviene de una discusión (Nelson et al, 1988; Medina, 1990) en la que se comparaban mediciones realizadas a similar profundidad.

⁴⁸ Otra solución es la propuesta por Stiassnie and Drimer en 2006, que no se incluye por mayor complejidad.

⁴⁹ Bowers (1992) indica que aunque la expresión está obtenida para aguas someras, los resultados pueden considerarse "razonablemente" válidos para situaciones como $k \cdot d = 1$. Por otra parte, refiere que la altura de ola unidireccional predice valores del orden del doble de los que se obtendrían con la expresión multidireccional.

Tabla II.3. Valores en la literatura para la estimación de la altura de la onda de infragravedad.

Primer autor (año)	K^*	A_1	A_2	A_3
Vis (1985)		2	1.2	0
Nelson (1988)		1.77	1.77	0
Medina (1990)		2	0.5	0
Bowers (1992)		1.11	1.25	0.25
Port Talbot	0.0064	1.32	1.17	0.34
Shoreham harbour	0.0074	0.93	0.99	0.06
Barrow-in-Furness	0.0024	1.08	1.59	0.36
Díaz, 2006				
Puerto de Gijón	0.0068	1.402	0.66	0
Puerto de Lastres	0.007	1.36	0.81	0
Melito, 2007				
Port of Carrara	0.0084	1.2	0.78	0
López et al, 2012				
Port of Ferrol	0.005	1.265	1.3	0.328
Port of Ferrol	0.002	1.264	1.293	0

(*) K =factor proporcionalidad

La variabilidad en los valores indicados en la *Tabla II.3* para los ajustes experimentales puede justificarse según Bowers (1992) por la influencia de la localización en la que se tomaron las medidas. Lara (2004) argumenta dicha variabilidad como la falta de respuesta definitiva a la determinación de las características de onda larga. Por lo tanto, Lara (2004) propone una metodología para el cálculo de una función de probabilidad para la onda larga (altura de ola y periodo), que defina el clima marítimo para esta banda de frecuencias que componen el oleaje junto con las ondas cortas basándose en campañas de medición en prototipo. Díaz (2006) emplea la técnica de representación espectral tipo *wavelet*, para el análisis de la transitoriedad al incorporar la dimensión temporal en la observación del espectro de energía, permitiendo así conocer las transferencias energéticas que se presentan durante los episodios de resonancia portuaria.

II.2. Métodos analíticos para la estimación de la respuesta resonante

Las oscilaciones en una masa de agua son la respuesta a la acción de una fuerza exterior que altera su equilibrio. La amplitud de la oscilación dependerá de la intensidad de la acción exterior, de los mecanismos de disipación (fricción, viscosidad, etc.) y, si la acción exterior es periódica, de la proximidad entre las frecuencias de la acción exterior y las naturales de la masa de agua.

Las oscilaciones son provocadas por una acción exterior que ha dejado de actuar se transmiten como *oscilaciones libres* en la masa de agua con la frecuencia de oscilación propia. La persistencia en el tiempo de una acción exterior periódica en el tiempo, con frecuencias distintas de las naturales de la masa de agua, produce

oscilaciones forzadas con frecuencias ligadas a las de la causa que las origina. Una vez la causa exterior deje de actuar, la amplitud de la oscilación se amortiguará rápidamente, excepto si las frecuencias de la acción exterior se aproximan a las frecuencias naturales de oscilación de la masa de agua. La proximidad entre las frecuencias de la fuerza exterior y las propias de la masa de agua amplifican las oscilaciones en el fenómeno de la *resonancia*⁵⁰.

Las frecuencias propias de oscilación, o *modos resonantes*, de las masas de agua confinadas dependen de su geometría, siendo independientes de la magnitud de la fuerza exterior que las genera. El modo resonante con la menor frecuencia es el denominado *modo fundamental* de oscilación⁵¹. Las oscilaciones resonantes que tienen lugar en masas de agua aisladas se denominan típicamente *seiches* mientras que las que tienen lugar en recintos parcialmente cerrados conectados con una o varias aberturas al mar se denominan *oscilaciones portuarias* (Wiegel, 1964) o *coastal seiches* (Giese y Chapman, 1993).

Las principales diferencias entre las oscilaciones en masas de agua conectadas con el mar y las cerradas son (Rabinovich, 1993):

- La generación de las oscilaciones en dársenas con aberturas es producida generalmente por la entrada de energía de baja frecuencia del mar a la masa de agua a través de la bocana.
- Además de las pérdidas de disipación por fricción, viscosidad, etc., el mayor amortiguamiento se produce por la radiación de energía a través de las conexiones con el exterior.
- La existencia de un modo resonante fundamental denominado *modo Helmholtz* o *pumping mode*, similar al tono fundamental de un resonador acústico.

II.2.1. Analogía mecánica

La respuesta de un sistema mecánico con amortiguamiento viscoso permite establecer una analogía para el estudio del comportamiento de las oscilaciones en un cuerpo de agua confinado en un recinto. El símil mecánico previo a la consideración de aspectos hidrodinámicos específicos simplifica la identificación de los mecanismos de respuesta oscilatorios. Se presentan las soluciones para dársena simple y sistema de dársenas interconectadas estableciendo las condiciones de evolución de las oscilaciones en función de las características de amortiguamiento para oscilaciones libres y forzadas.

⁵⁰ En el caso de que la fuente que genera la oscilación tuviera un espectro de frecuencias ancho, selectivamente se excitarán las frecuencias de oscilación próximas a los modos resonantes (Sorensen and Thompson, 2008). Al cesar la fuerza exterior las oscilaciones forzadas decaerán rápidamente, mientras que los modos libres persistirán por más tiempo (Rabinovich, 2009).

⁵¹ Los efectos más perniciosos asociados a fenómenos resonantes tienen lugar con la frecuencia del modo fundamental.

II.2.1.1. Dársena individual unidimensional

Un sistema mecánico formado por un oscilador armónico con un grado de libertad, de masa M unido a un resorte lineal de constante de amortiguación k_m , en un medio viscoso con fricción γ_f , sometido a una fuerza exterior periódica sinusoidal de amplitud F_{ext} y frecuencia $f_{ext}=1/\omega_{ext}$, con ω_{ext} la frecuencia angular, puede ser descrito por la siguiente ecuación diferencial:

$$\underbrace{M \cdot \frac{d^2 x_m}{dt^2}}_{\text{inercia}} + \underbrace{\gamma_f \cdot \frac{dx_m}{dt}}_{\text{amortiguación}} + \underbrace{k_m \cdot x_m}_{\text{restitución}} = \underbrace{F_{ext} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}}_{\text{perturbación}} \quad (II.4)$$

con $x_m=x_m(t)$ la elongación del resorte o distancia que ocupa la masa respecto de la posición de equilibrio, γ_f el coeficiente de rozamiento viscoso, $\omega_0 = \sqrt{k_m/M}$ la frecuencia angular del movimiento armónico simple con la que oscilaría si no tuviera rozamiento y $\beta=\gamma_f/(2 \cdot M)$ la tasa de amortiguación.

Si no existiera fuerza exterior, la solución a la ecuación diferencial homogénea constituirá una respuesta transitoria del tipo:

$$x_{m,no_Ext}(t) = A_1 \cdot e^{-\lambda_1 |t|} + A_2 \cdot e^{-\lambda_2 |t|}; \text{ donde } A_1 \text{ y } A_2 \text{ constantes} \quad (II.5)$$

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \\ \lambda_2 &= -\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \end{aligned} \quad (II.6)$$

Quando la frecuencia angular de la oscilación libre sea $\omega_0 < \beta$ se generará una *oscilación sobreamortiguada*, que una vez producida retorna lentamente al equilibrio. En el caso en que $\omega_0 > \beta$, la oscilación es *subamortiguada*, produciéndose oscilaciones alrededor de la posición de equilibrio en reposo con amplitudes que decrecen exponencialmente (ver Fig. II.9).

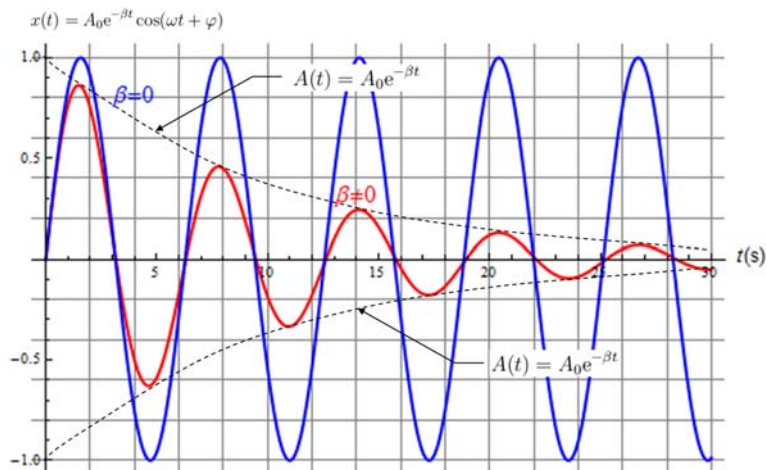


Figura II.9. Oscilación libre subamortiguada comparada con la que se produciría sin amortiguación.

La Fig. II.10 muestra el comportamiento de las oscilaciones libres en función de la amortiguación.

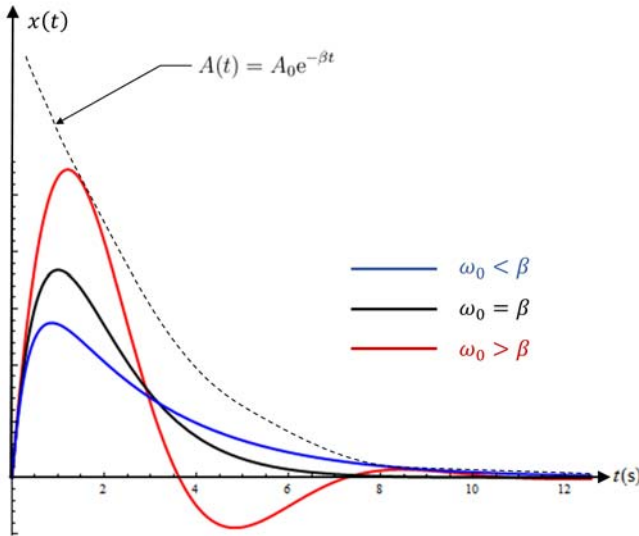


Figura II.10. Evolución de las oscilaciones en función de la amortiguación.

En el caso en que actúe una fuerza exterior, provocando oscilaciones forzadas en la masa de agua, la solución a la ecuación diferencial será una combinación entre la solución de la ecuación homogénea y la solución particular del término independiente, de la forma:

$$x_{m,ext}(t) = \underbrace{\frac{A_0 \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi_0)}{\text{transitorio}}}_{\text{transitorio}} + \underbrace{\frac{A_{ext} \cdot \cos(\omega_{ext} \cdot t + \varphi_{ext})}{\text{permanente}}}_{\text{permanente}} \quad (II.7)$$

con A_{ext} amplitud de las solución permanente y φ_0 y φ_{ext} los ángulos de desfase correspondientes (Palomino et al, 2001):

$$A_{ext} = \frac{F_{ext}/M}{\sqrt{(\omega_{ext}^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \beta^2 \cdot \omega_{ext}^2}} \quad (II.8)$$

La frecuencia de la respuesta permanente es la de la fuerza exterior, con lo que al desaparecer la oscilación transitoria, el sistema es forzado a oscilar con la frecuencia que se le impone con un cierto desfase respecto de la fuerza exterior.

Analizando la expresión de la amplitud de la oscilación forzada en régimen permanente, el valor de ω_{ext} que la maximiza es:

$$\omega_{ext} = \sqrt{\omega_0^2 - 2 \cdot \beta} \quad (II.9)$$

Lo que supone que la transmisión de energía al sistema es máxima, y por lo tanto con poca amortiguación $\omega_{ext} \approx \omega_0$.

La Fig II.11 representa el factor de amplificación⁵² en función de la fricción y de la relación entre las frecuencias angulares de la acción exterior y la natural del sistema. Si $\omega_{ext} \ll \omega_0$ la respuesta del sistema es similar a la de excitación, amplificándose a medida que la frecuencia de excitación se aproxima a la natural del sistema. La mayor amplificación se produce cuando $\omega_{ext} = \omega_0$ con un desfase de 90° (Sorensen y Thompson, 2008).

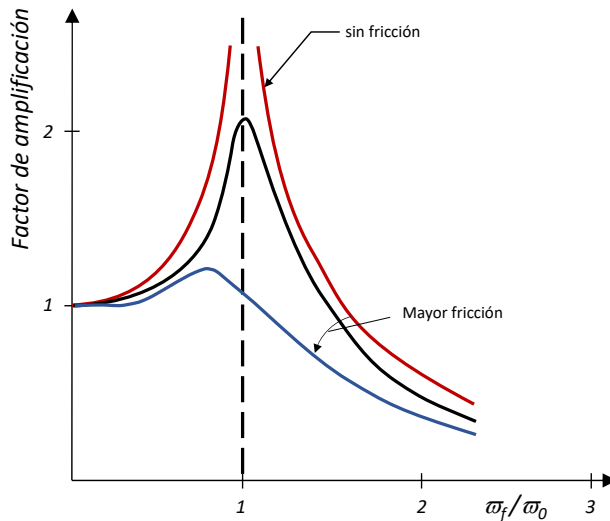


Figura II.11. Factor de amplificación en función de la fricción y frecuencias exterior y natural del sistema (adaptado de Sorensen y Thomson, 2008).

II.2.1.2. Dársenas interconectadas

El sistema de dos dársenas aisladas interconectadas entre sí puede analizarse como un sistema de *péndulos líquidos*⁵³. La energía de oscilación en un sistema de dos péndulos simples unidos mediante un muelle con constante de amortiguación pequeña⁵⁴ se transmite alternativamente de una parte a otra del sistema. En cada oscilación, el primer péndulo comprime el muelle y éste transmite un empuje al segundo péndulo contribuyendo a su oscilación. A su vez, el segundo péndulo, devuelve energía al primero en su oscilación. En cada ciclo la energía de oscilación pasa de uno a otro péndulo hasta que el movimiento es amortiguado al consumirse la energía por fricción.

⁵² Cociente entre el desplazamiento total y el de excitación, o más habitualmente en los estudios de resonancia portuaria (Zelt, 1986), la relación entre la altura de onda medida en el paramento frontal interior de una dársena respecto del doble de la altura de ola incidente en la bocana (ver II.2.2.2).

⁵³ El término *"liquid pendulums"* es propuesto en 1983 por Nakano y Fujimoto (Rabinovich, 2009).

⁵⁴ Supuesta oscilación subamortiguada para que no elimine la transmisión de la oscilación de una dársena a la adyacente.

II.2.2. Hidrodinámica de los modos libres de oscilación

Los modos de libres de oscilación en masas de agua confinadas, abiertas o cerradas, pueden ser estimados a partir de las ecuaciones de la hidrodinámica para la onda larga. La teoría de onda larga es de aplicación cuando la profundidad de la lámina de agua es reducida con relación a la longitud de onda, con lo que la distribución de presión es la hidrostática y puede asumirse que la distribución vertical de velocidad horizontal es uniforme.

Para el caso de desplazamiento unidireccional en sentido del eje x , las ecuaciones de continuidad y de la cantidad de movimiento quedan⁵⁵:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial [u \cdot (d + \eta)]}{\partial x} = 0 \quad (II.10)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} = -g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho(d + \eta)} \quad (II.11)$$

con $\eta(x, t)$ representando la posición de la superficie libre en vertical respecto de la de reposo, u =velocidad horizontal (constante en vertical), d =profundidad y τ =tensión debida a la fricción.

Despreciando el término no lineal en la ecuación de continuidad y el término convectivo y de fricción en la ecuación de la cantidad de movimiento, las ecuaciones quedan⁵⁶:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial (u \cdot d)}{\partial x} = 0 \quad (II.12)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (II.13)$$

Si la profundidad d es constante, diferenciando la ecuación de continuidad con respecto a t y la ecuación de la cantidad de movimiento con respecto a x , y viceversa, se obtienen las ecuaciones lineales de onda larga:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - g \cdot d \cdot \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0 \quad (II.14)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - g \cdot d \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \quad (II.15)$$

La solución del sistema es una onda progresiva del tipo (Lamb, 1945):

$$\eta_1 = \frac{H}{2} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t) \quad (II.16)$$

⁵⁵ No se incluyen en el desarrollo las componentes de Coriolis, la tensión provocada por el viento en la superficie, ni el gradiente de presión atmosférica en el término de presión que conduciría a las ecuaciones para el estudio de la marea meteorológica. Asimismo, tampoco se tienen en cuenta las fuerzas de atracción del Sol y la Luna que permitiría definir las ecuaciones del movimiento de las mareas. Tampoco se incluye la corrección por curvatura del flujo típico de las ecuaciones de Boussinesq.

⁵⁶ Existen un gran número de soluciones exactas para varias configuraciones geométricas y toográficas (Le Mehauté, 1976)

tal que:

$$u = \frac{H}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \cos(k \cdot x - w \cdot t) \quad (\text{II.17})$$

con $k=(2 \cdot \pi)/L$, el número de onda y $w=(2 \cdot \pi)/T$, y $L = T \cdot \sqrt{g \cdot d}$ ⁵⁷

Si la anterior onda larga progresiva se refleja en un contorno con coeficiente de reflexión⁵⁸ $\chi=1$, aparecerá una onda progresiva desplazándose en sentido opuesto:

$$\eta_2 = \frac{H}{2} \cdot \cos(-k \cdot x - w \cdot t) \quad (\text{II.18})$$

La onda estacionaria que se forma como suma de las ondas incidente y reflejada, $\eta_1 + \eta_2$, es también solución de las ecuaciones descritas para la onda larga debida a la linealidad de las mismas, teniendo por expresión:

$$\eta_1 + \eta_2 = H \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(w \cdot t) \quad (\text{II.19})$$

Con:

$$u = H \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \cdot \text{seno}(k \cdot x) \cdot \text{seno}(w \cdot t) \quad (\text{II.20})$$

II.2.2.1. Masas de agua confinadas aisladas (dársena cerrada)

La oscilación en lagos puede iniciarse debido a cambios en la presión atmosférica o el viento; en canales por aporte o sustracción de caudal; o en ambos por efectos sísmicos. Las oscilaciones, en el caso de dársenas portuarias, generalmente, son activadas a través de las conexiones con el exterior, diferenciándose de las masas de agua aisladas en la generación. Sin embargo, el comportamiento de gran parte de dársenas portuarias en las que el ancho de la bocana sea mucho menor que la anchura media del puerto o dársena puede asemejarse al de una dársena cerrada (Sorensen y Thompson, 2008).

A continuación se exponen los resultados de formas geométricas sencillas abordables analíticamente. Éstos pueden ser útiles para la aproximación al análisis de modos de oscilación asociados a geometrías más complejas o profundidades irregulares. En general, las dársenas de formas geométricas complejas requieren el uso de modelos numéricos.

- *Canal rectangular estrecho cerrado por ambos extremos*

La geometría más sencilla es la de un canal rectangular estrecho limitado por extremos verticales y profundidad constante. La condición de contorno

⁵⁷ La celeridad o velocidad de propagación de la onda $c = L/T = \sqrt{g \cdot d}$ fue deducida por Lagrange en 1781 (Palomino et al., 2001).

⁵⁸ El coeficiente de reflexión puede definirse como la relación entre la altura de la ola reflejada respecto de la altura de ola incidente.

cerrado-cerrado en los extremos en el sentido de propagación de la onda $x=0$ y $x=l$ impone que el flujo sea nulo, con lo que los valores compatibles del número de onda son:

$$k = \frac{\pi}{l}, \frac{2\pi}{l}, \frac{3\pi}{l}, \dots, \frac{n\pi}{l} \quad (II.21)$$

donde n indica el modo de oscilación específico de los modos propios de oscilación de la masa de agua, coincidiendo con el número de líneas nodales. La Fig. II.12 representa los perfiles de la superficie libre de la masa de agua aislada para los cuatro primeros modos propios de oscilación.

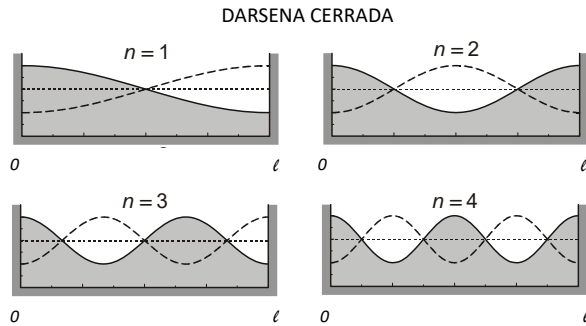


Figura II.12. Perfil de la superficie libre para los cuatro primeros modos de oscilación de la dársena cerrada con profundidad uniforme

La longitud de onda del modo fundamental o uninodal, $L_{n=1}^{cerrada}$ es igual al doble de la longitud del canal, l , por lo que se denomina oscilador de media onda o *half-wave oscillator* (Korgen, 1995). Los restantes tonos son los armónicos del tono principal o fundamental, con longitudes de onda iguales a $L_{n=1}^{cerrada} / n$.

Los nodos corresponden con desplazamientos horizontales máximos y verticales nulos, $\eta=0$, siendo su posición:

$$x_n^p = \frac{(2\cdot p-1)\cdot l}{2\cdot n}, \quad p, n = 1, 2, \dots; p \leq n \quad (II.22)$$

Los antinodos ocupan las posiciones donde se produce la mayor oscilación y desplazamiento horizontal nulo:

$$x_n^q = \frac{q\cdot l}{2\cdot n}, \quad q = 0, 1, 2, \dots, n; n = 1, 2, \dots \quad (II.23)$$

Los periodos naturales de oscilación de una dársena cerrada con profundidad constante, d , se obtienen a partir de la conocida formula de Merian:

$$T_n = \frac{2\cdot l}{n\cdot \sqrt{g\cdot d}} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (II.24)$$

Así pues, las dársenas de mayor longitud y/o de menor profundidad oscilarán con los periodos naturales mayores, siendo el mayor periodo el asociado al modo fundamental ($n=1$ para dársena cerrada). La forma de la superficie libre en los modos naturales impares es anti-simétrica mientras que los pares es simétrica.

Alternativamente, el periodo natural o propio de oscilación de la masa de agua asilada para el modo fundamental puede definirse como el tiempo empleado por una onda en desplazarse de un extremo reflejante ($x=l$) al siguiente ($x=0$), y tras reflejarse, alcanzar nuevamente el primero ($x=l$).

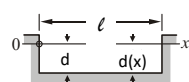
La energía para las oscilaciones asociadas a cada modo n vendrá dada por:

$$E = n \cdot \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (II.25)$$

con lo que la energía aumenta con el número de nodos. Los modos armónicos requieren más energía que el fundamental a igualdad de amplitud. Por lo tanto, las masas de agua tenderán a oscilar con el periodo más alto posible minimizando la energía.

Wilson (1972) obtuvo soluciones analíticas para varias dársenas de formas geométricas simples y profundidades variables. En la *Tabla II.4* se muestran las correspondientes a geometría rectangular con fondo constante y escalonado.

Tabla II.4. Modos de oscilación en dársenas unidimensionales rectangulares con profundidad constante (adaptado de Wilson, 1972).

Tipo de dársena			Periodos naturales de oscilación				
Descripción	profundidad	dimensiones	Fundamental T_1	Valores de T_n/T_1 para modos			
				1	2	3	4
Rectangular			$\frac{2 \cdot l}{\sqrt{g \cdot d}}$	1.000	0.500	0.333	0.250
Rectangular escalonada	$d(x) = d_1(x < 0)$ $d(x) = d_2(x > 0)$	$l_1 / l_2 = 1/2$	$4 \cdot l_2 / \sqrt{g \cdot d_2}$	1.000	0.500	0.333	0.250
		$l_1 / l_2 = 1/3$	$3.13 \cdot l_2 / \sqrt{g \cdot d_2}$	1.000	0.559	0.344	0.217
		$l_1 / l_2 = 1/4$	$2.73 \cdot l_2 / \sqrt{g \cdot d_2}$	1.000	0.579	0.367	0.252
		$l_1 / l_2 = 1/8$	$2.31 \cdot l_2 / \sqrt{g \cdot d_2}$	1.000	0.525	0.371	0.279

▪ *Dársenas bidimensionales cuadradas o rectangulares*

Para dársenas bidimensionales cuadradas o rectangulares, en las que no exista una dimensión principal mucho mayor que la secundaria, con

profundidad constante, las oscilaciones en distintas direcciones pueden superponerse con efectos bidimensionales no despreciables. La literatura científica describe los casos correspondientes a dársenas rectangulares y circulares con profundidad constante (Rabinovich, 2008).

Las oscilaciones en una dársena bidimensional de longitud l_x y ancho l_y se describen mediante la ecuación de la onda estacionaria bidimensional (Lamb, 1945):

$$\eta_{2D} = A_{mn} \cdot \cos\left(\frac{m \cdot \pi}{l_x} \cdot x\right) \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{l_y} \cdot y\right) \cdot \cos(w \cdot t) \quad m, n = 0, 1, 2, 3 \quad (II.26)$$

Generalmente, los valores de m y n indican el número de líneas nodales a lo largo y ancho de la dársena, respectivamente, de forma análoga al caso unidimensional.

Los números de onda propios son:

$$k_{mn} = \sqrt{\left[\left(\frac{m \cdot \pi}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n \cdot \pi}{l_y}\right)^2\right]} \quad m, n = 1, 2, 3 \dots \quad (II.27)$$

y los correspondientes periodos naturales de oscilación:

$$T_{mn} = \frac{2}{\sqrt{g \cdot d}} \cdot \sqrt{\left[\left(\frac{m}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n}{l_y}\right)^2\right]} \quad m, n = 1, 2, 3 \dots \quad (II.28)$$

La fórmula de Merian se obtiene particularizando para $n=0$ en la expresión anterior.

Wilson (1972) obtuvo soluciones analíticas para varias dársenas bidimensionales rectangulares para distintos modos resonantes. La *Tabla II.5* muestra las características principales de los modos de oscilación naturales en dársenas bidimensionales rectangulares.

- *Dársenas circulares*

En las dársenas circulares las oscilaciones bidimensionales también pueden superponerse. Para las dársenas circulares de profundidad constante, las líneas nodales pueden ser anillos o diámetros⁵⁹ o combinación de ambas. La *Tabla II.5* muestra las características principales de los modos de oscilación naturales en dársenas bidimensionales rectangulares o circulares.

⁵⁹ La posición de los diámetros en dársenas circulares de profundidad constante no puede determinarse. En el caso en que la dársena sea una elipse, las líneas nodales coincidirán con el eje mayor o menor (Rabinovich, 2009).

Tabla II.5. Modos de oscilación en dársenas bidimensionales rectangulares y circulares con profundidad constante (adaptado de Wilson, 1972).

Dársena rectangular $\ell_y = 0.5 \cdot \ell_x$				Dársena circular $r=a$						
Modos		Líneas modales	Periodo relativo	Modos		Líneas modales	Posición círculos nodales	Frecuencia normalizada	Periodo relativo	
m	n		T_{mn}/T_{10}	s	m		r_1	r_2	$\omega a/c$	T_{sm}/T_{10}
1	0		1.000	1	0		-	-	1.841	1.000
2	0		0.500	2	0		-	-	3.054	0.603
0	1		0.500	0	1		0.628	-	3.832	0.480
1	1		0.447	1	1		0.719	-	5.331	0.345
2	1		0.354	2	1		0.766	-	6.706	0.275
0	2		0.250	0	2		0.343	0.787	7.016	0.262
1	2		0.243	1	2		0.449	0.820	8.536	0.216

▪ **Dársenas interconectadas entre sí.**

La estimación de los periodos de oscilación natural de un sistema de dársenas aisladas pero interconectadas entre sí puede obtenerse dividiendo el sistema en unidades con modos de oscilación propios. El caso más sencillo corresponde con el de dos dársenas rectangulares de profundidad uniforme con dimensiones diferentes conectadas entre sí mediante un canal estrecho, con una de ellas suficientemente grande en relación a la segunda⁶⁰.

Para el caso de las dársenas comunicadas por un canal estrecho representadas en la Fig. II.13, si la sección del canal es muy pequeña con relación a la de la dársena principal, el agua oscilará en ésta como si estuviera cerrada⁶¹, provocando intercambio de flujos entre las dársenas a través del canal. Debido a que el canal y las dársenas tienen modos propios de oscilación distintos, el periodo de oscilación del sistema será también diferente del de la dársena principal.

⁶⁰ Para el caso general de un número cualquiera de dársenas conectadas entre sí, la estimación del periodo de oscilación conjunta del sistema puede efectuarse de una forma más sencilla a partir del concepto de impedancia de un sistema oscilatorio (Newman y Pierson, 1966). La única restricción para la aplicación del método es que las dársenas han de ser rectangulares y de profundidad constante.

⁶¹ Con lo que el modo de oscilación de la dársena principal podría estimarse con la fórmula de Merian.

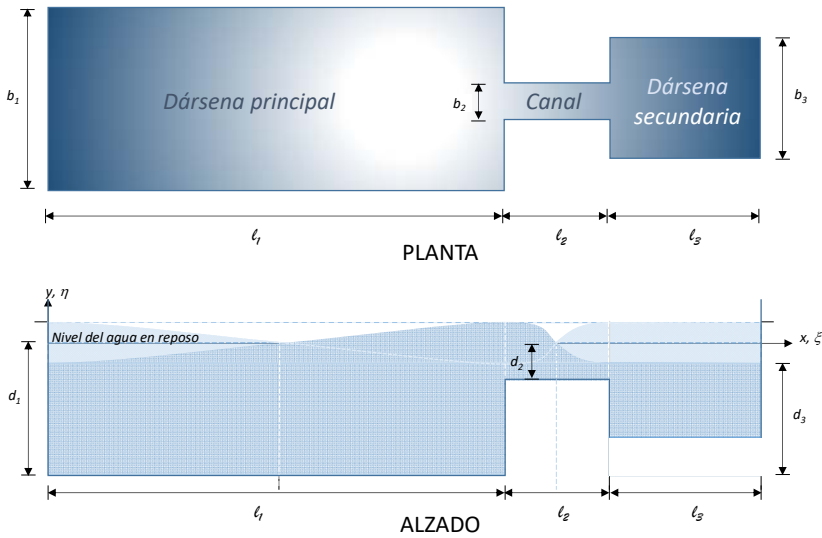


Figura II.13. Esquema de dos dársenas interconectadas entre sí por un canal

Las condiciones de contorno en las secciones $x=0$, $x=l_1$ y $x=l_1+l_2$ pueden suponerse:

$$\begin{aligned}
 x = 0 & \quad \xi_1^{izquierda} = 0 \\
 x = l_1 & \quad \xi_1^{derecha} = \frac{b_2 \cdot d_2}{b_1 \cdot d_1} \cdot \xi_2^{izquierda} \quad \eta_1^{derecha} = \eta_2^{izquierda} \\
 x = l_1 + l_2 & \quad \xi_2^{derecha} = \frac{b_3 \cdot d_3}{b_2 \cdot d_2} \cdot \xi_3^{izquierda} \quad \eta_2^{derecha} = \eta_3^{izquierda} \quad \xi_3^{derecha} = 0
 \end{aligned} \quad (II.29)$$

siendo ξ y η los desplazamientos horizontal y vertical, respectivamente.

Estableciendo las expresiones de continuidad y cantidad de movimiento para las secciones $x=0$, $x=l_1$ y $x=l_1+l_2$ haciendo uso de las condiciones de contorno, Palomino et al (2001) obtienen⁶² los periodos naturales de oscilación supuesto $b_3 \cdot d_3 \ll b_1 \cdot d_1$:

$$\begin{aligned}
 \text{Dársena principal} & \quad T_1 = \frac{2 \cdot l_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} \\
 \text{Dársena secundaria} & \quad T_3 = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{g \cdot h_3}} \cdot \sqrt{\frac{l_3 \cdot b_3}{(b_2 \cdot d_2 / l_2)}} \\
 \text{Sistema} & \quad T_{1+2} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{l_2}{g \cdot (b_2 \cdot d_2)} \cdot \frac{(l_1 \cdot b_1) \cdot (l_3 \cdot b_3)}{(l_1 \cdot b_1) + (l_3 \cdot b_3)}}
 \end{aligned} \quad (II.30)$$

Denominándose conductividad de la dársena a la relación $Z_i = (b_i \cdot d_i / l_i)$.

⁶² Válido si el movimiento de agua en el canal se limita a corrientes de compensación de volúmenes entre las dársenas, sin oscilaciones en el mismo.

II.2.2.2. Masas de agua confinadas conectadas con el exterior (dársena abierta)

El comportamiento de las masas de aguas confinadas, bahías, estuarios, canales, puertos artificiales, etc., conectadas con un cuerpo de agua mucho mayor es distinto del de las masas de agua aisladas. El volumen de la masa de agua mayor debe ser suficiente como para que el nivel de ésta pueda considerarse invariable. Así pues, puesto que debe existir continuidad en el nivel de agua al pasar de la masa de agua mayor a la menor, el contacto entre ambas, en el extremo abierto, definirá una línea nodal⁶³.

Por otra parte, la causa exterior que generará las oscilaciones en una masa de agua conectada con el exterior, mar abierto u océano, será generalmente la entrada de energía en forma de ondas de infragravedad, corrientes y tsunamis (Sorensen y Thompson, 2008) por la abertura que comunica las dos masas de agua⁶⁴. Asimismo, la misma abertura condicionará la disipación de la oscilación mediante radiación al exterior.

A continuación se exponen los resultados de geometrías portuarias simples que pueden ser obtenidos de forma analítica. Éstas permiten estimar la respuesta de geometrías más complejas o profundidades irregulares. En general, las dársenas de formas geométricas complejas requieren el uso de modelos numéricos.

- *Canal rectangular estrecho completamente abierto en un extremo*

De la misma forma que en las dársenas cerradas, el caso clásico más sencillo es el definido por una dársena rectangular estrecha de profundidad constante, sin considerar disipación, con un extremo abierto al exterior y el extremo opuesto cerrado. Superponiendo linealmente la onda incidente que penetra al puerto desde la bocana ($x=l$) con la reflejada en el paramento vertical frontal interior ($x=0$), se tiene una onda estacionaria:

$$\eta_{total} = \eta_1 + \eta_2 = H \cdot \cos(k \cdot x) \cdot \cos(w \cdot t) \quad (II.31)$$

La condición de contorno cerrado-abierto en los extremos en el sentido de propagación de la onda $x=0$ y $x=l$ impone que el flujo sea nulo en el extremo $x=0$ y el nivel sea igual al del exterior, $\eta_{total}(x=l, t)=0$. Los valores de la fase compatibles con $\eta_{total}=0$ tienen lugar para $kx=\pi/2, 3 \cdot \pi/4, \dots$. La necesidad de formación de una línea nodal en $x=l$ obliga a que los valores compatibles del número de onda sean:

$$k = \frac{\pi}{2 \cdot l}, \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot l}, \frac{5 \cdot \pi}{2 \cdot l}, \dots (2 \cdot n + 1) \cdot \frac{\pi}{2 \cdot l} \quad (II.32)$$

⁶³ Más exactamente,, en un caso real con disipación, la línea modal se sitúa en las proximidades de la bocana, pero desplazada hacia mar abierto.

⁶⁴ Los efectos sísmicos de carácter local también pueden provocar oscilaciones. Las mareas meteorológicas quedan limitadas, generalmente, a área más extensas que las asociadas a áreas portuarias.

donde n indica el modo de oscilación específico de los modos propios de oscilación de la masa de agua, coincidiendo con el número de líneas nodales en el interior de la dársena, sin contar la que se forma en bocana.

La posición de los nodos, correspondiendo con desplazamientos horizontales máximos y verticales nulos, $\eta=0$, es:

$$x_n^p = \frac{(2 \cdot p + 1) \cdot l}{2 \cdot n + 1}, \quad p, n = 0, 1, 2, \dots; p \leq n \quad (II.33)$$

Los antinodos ocupan las posiciones donde se produce la mayor oscilación y desplazamiento horizontal nulo:

$$x_n^q = \frac{2 \cdot q \cdot l}{2 \cdot n + 1}, \quad q, n = 0, 1, 2, \dots; q \leq n \quad (II.34)$$

Los periodos naturales de oscilación de una dársena cerrada con profundidad constante, d , son (Wilson, 1972):

$$T_n = \frac{4 \cdot l}{(2 \cdot n + 1) \cdot \sqrt{g \cdot d}} \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (II.35)$$

Y las velocidades máximas y media de corriente asociadas a las líneas nodales (Sorensen, 1986):

$$u_{max}\left(\frac{\pi}{2} \cdot k, t\right) = \frac{H}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (II.36)$$

$$\bar{u}\left(\frac{\pi}{2} \cdot k, t\right) = \frac{H \cdot L}{\pi \cdot d \cdot T_n} \quad (II.37)$$

con desplazamiento máximo horizontal de las partículas:

$$\xi_{max}\left(\frac{\pi}{2} \cdot k, t\right) = \frac{H \cdot T_n}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{d}} \quad (II.38)$$

Las dársenas cerradas-abiertas tienen un modo de oscilación fundamental específico no presente en las dársenas cerradas, denominado *modo Helmholtz* o de *bombeo*⁶⁵. El modo fundamental Helmholtz, se corresponde con la formación de una única línea nodal en la bocana de la dársena ($x=l$) y un único antinodo en el paramento interior frontal ($x=0$). La longitud de onda de éste modo coincide con cuatro veces la longitud de la dársena, por lo que Korgen (1995) lo denomina *oscilador de cuarto de onda*. Es el modo resonante más relevante en bahías, estuarios y en puertos con bocanas estrechas (Rabinovch, 2009). El periodo de oscilación para el modo Helmholtz es:

$$T_0 = \frac{4 \cdot l}{\sqrt{g \cdot d}} \quad (II.39)$$

⁶⁵ El término modo de bombeo ("pumping mode") se refiere al transporte de masa que tiene lugar a través de la entrada a la dársena.

La Fig. II.14 representa los perfiles de la superficie libre de la dársena rectangular estrecha para los cuatro primeros modos propios de oscilación.

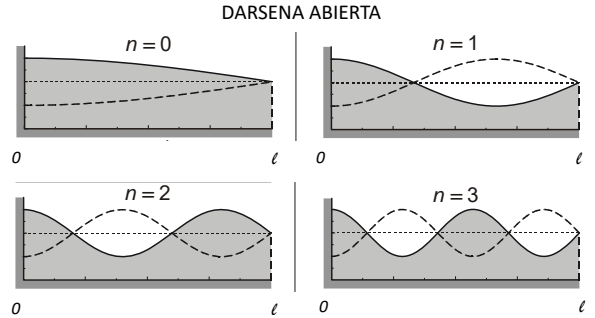


Figura II.14. Perfil de la superficie libre para los cuatro primeros modos de oscilación de la dársena cerrada-abierta con profundidad uniforme.

Una onda larga cualquiera provocará una amplitud de ola en la entrada:

$$\eta_{max}(x = l, t) = H \cdot \cos(k \cdot l) \quad (II.40)$$

Con k , H el número de onda y la altura de onda de la onda larga incidente, respectivamente.

La amplificación en las oscilaciones puede evaluarse mediante el *factor de amplificación*, A , que indica la relación entre la amplitud de la oscilación en el paramento reflejante ($x=0$), respecto de la amplitud en la bocana ($x=l$):

$$A = \left| \frac{\eta_{max}(x=0,t)}{\eta_{max}(x=l,t)} \right| = \frac{1}{\cos(k \cdot l)} \quad (II.41)$$

que para dársenas con longitudes l próximas a $(2 \cdot n - 1) \cdot (L/4)$ con $n=1, 2, 3, \dots$, la amplificación tiende a infinito⁶⁶ debido al fenómeno de la resonancia.

Si se introduce la fricción en el análisis (como se expone para la analogía mecánica en el apartado II-2-1), el factor de amplificación A es un valor finito para la condición de equilibrio del sistema. La Fig. II.15 muestra la respuesta resonante de una dársena rectangular estrecha completamente abierta en un extremo (Ippen y Goda, 1963) definida en términos del *factor de amplificación*, A , respecto de la longitud relativa de la dársena $2 \cdot \pi \cdot (l_x/L)$. El factor de amplificación decrece con el número de modos resonantes justificando así la importancia de los modos asociados a los mayores periodos.

⁶⁶ El modelo empleado no considera los efectos disipativos.

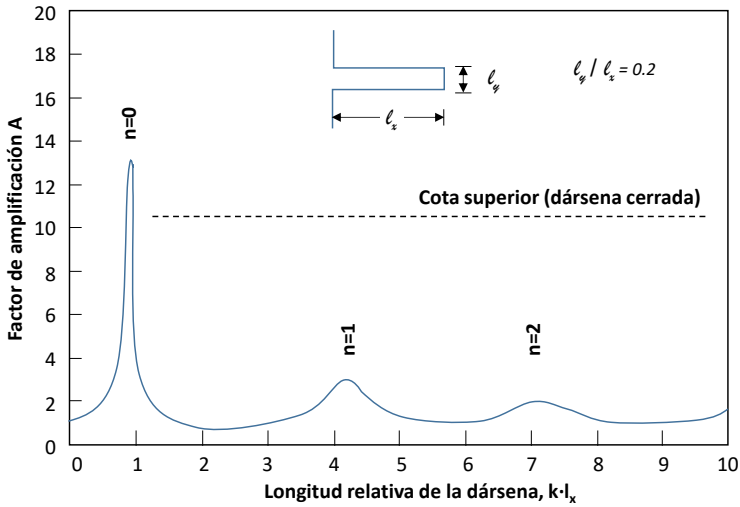


Figura II.15. Respuesta teórica de una dársena rectangular estrecha con un extremo completamente abierto (adaptado de Sorensen y Thompson, 2008).

El valor del factor de amplificación puede definirse a partir de la impedancia de la dársena⁶⁷ (Miles, 1971, Rabinovich, 2009) a partir del factor de disipación⁶⁸ Q :

$$A = \sqrt{\frac{1}{\left(1 - \frac{w_{ext}}{w_0}\right)^2 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{w_{ext}}{w_0}\right)^2}} \quad (II.42)$$

donde
$$Q = \frac{w_{ext} \cdot E}{dE/dt} = \frac{1}{2 \cdot \beta} \quad (II.43)$$

con
$$E(t) = E_0 \cdot e^{-2 \cdot \beta \cdot t} \quad (II.44)$$

en la que β es el término de disipación adimensional⁶⁹.

El factor Q representa a capacidad de amortiguación del sistema. Valores elevados de Q implican una mayor amplificación y una menor tasa de amortiguación.

La acción exterior excitará la dársena hasta que las oscilaciones que se generen en ésta alcancen el régimen permanente en el que se alcanzará el equilibrio entre las fuerzas exteriores y los mecanismos disipativos. El tiempo mínimo que debe transcurrir es el correspondiente a Q/π ciclos de

⁶⁷ Ver analogía con la teoría de circuitos (ver apartado II.2.3). $A = \left(\frac{1}{|Z^2|}\right)^{1/2}$, con Z la impedancia de la dársena (Synolakis, 2003).

⁶⁸ También denominado "quality factor" o Q -factor (Rabinovich, 2009). Si la disipación tiende a 0, Q tiende a infinito.

⁶⁹ Denominado constante de amortiguamiento en la analogía mecánica (ver apartado II.2.1.1).

oscilación. Por lo tanto, las dársenas con elevados Q requerirán que la acción exterior actúe durante mayor tiempo (persistencia).

- *Canal rectangular bidimensional con profundidad constante. Efecto de la forma en planta y del tamaño de la abertura.*

La aproximación numérica de los modos propios de oscilación de dársenas de geometría sencilla y profundidad uniforme, expuesta en el apartado anterior, se ha obtenido como solución a la ecuación de ondas que resulta de las ecuaciones lineales de continuidad y momento, despreciando la fricción y asumiendo la posición de las líneas nodales.

De esta forma, en una dársena bidimensional, la condición de contorno asumida para la oscilación transversal es cerrado-cerrado (dársena aislada) con flujo transversal nulo (en $y = 0$ y $y = l_y$, siendo l_y la anchura de la dársena). La estimación de los modos propios de oscilación transversal se efectúa con la fórmula de Merian (Ec. II.24).

Para oscilación longitudinal la condición es de contorno cerrado-abierto. La condición en borde abierto ($x=l_x$, con l_x la longitud de la dársena) es la de continuidad de presión y flujo de masa. Luego, atendiendo al movimiento oscilatorio característico del interior (ver Fig. II.12), la oscilación longitudinal se suele referenciar como oscilaciones de un cuarto de longitud de onda mientras que el acoplamiento transversal se refiere en términos de oscilaciones de media longitud de onda (ver Fig. II.10).

Estas condiciones de contorno pueden variar para geometrías bidimensionales si se tiene en cuenta el *ancho relativo de bocana*:

$$\vartheta = \frac{a}{l_y} \quad \text{con } a = \text{ancho bocana} \quad (\text{II.45})$$

Cuando el ancho relativo de la bocana tiende a 0, el comportamiento de la dársena se aproxima al de una dársena cerrada. En consecuencia, a medida que el ancho relativo decrece, los periodos naturales aumentan hacia los valores de la dársena cerrada, excepto para el *modo Helmholtz* ($n=0$) en el que el periodo tiene a infinito (Rabinovich, 2009).

Por otra parte, la suposición de la existencia de un nodo o antinodo⁷⁰ en la bocana, dependiendo de la geometría, no es correcta. La solución exacta puede obtenerse aplicando la *condición de radiación de Sommerfeld* a las ondas libres que se radian al exterior (Lamb, 1945). El efecto de la *corrección de bocana* es incrementar la longitud efectiva de la dársena, de

⁷⁰ Dependiendo de la geometría del puerto (Zelt, 1986). Para bocanas estrechas, el comportamiento de la dársena podía aproximarse con el de una dársena aislada con antinodo en la posición de la bocana y para bocanas anchas la hipótesis de continuidad de niveles con el exterior hacía razonable suponer en la bocana una línea nodal.

forma que la línea nodal se forma en las proximidades de la bocana, pero hacia desplazada hacia el exterior⁷¹.

La estimación del periodo resonante correspondiente al *modo Helmholtz* obtenida por Carrier et al. (1971) es (Sorensen y Thompson, 2008):

$$T_{n=0} = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{(l_x + l'_x) \cdot l_y}{g \cdot d}} \quad (II.46)$$

Siendo l'_x el valor a añadir a la longitud de la dársena para tener en cuenta el efecto de corrección de la bocana:

$$l'_x = \frac{-l_y}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot l_y}{\sqrt{g \cdot d} \cdot T_{n=0}}\right) \quad (II.47)$$

Los diques de abrigo definen la anchura de bocana de forma que se proteja frente al oleaje permitiendo, asimismo, la navegación en condiciones de seguridad. Podría plantearse, que a medida que se reduce el ancho de la bocana la oscilación en el interior decrecerá. Sin embargo, si no se incluyen las pérdidas viscosas en el análisis, las oscilaciones en el interior de la dársena aumentarían indefinidamente (Miles y Munk, 1961) al no poder disiparse ni por fricción ni a través de la bocana en la situación de resonancia⁷².

Este resultado es el denominado *Paradoja del Puerto*. Al disminuir el tamaño de la bocana para limitar la energía entrante se provocan mayores amplificaciones en la respuesta oscilatoria de la masa de agua interior. Si se considera el proceso de radiación de energía al exterior, las amplitudes en el interior se estabilizan en un valor finito resolviéndose así la paradoja.

El efecto de la radiación hacia el exterior depende obviamente del ancho relativo de bocana, pero también depende de de la relación de aspecto:

$$q = \frac{l_y}{l_x} \quad (II.48)$$

siendo más importante cuanto mayor es la relación de aspecto, pudiendo considerarse suficientemente aproximadas las expresiones obtenidas sin disipación para dársenas estrechas y largas (Rabinovich, 2009).

Para dársenas rectangulares, bidimensionales parcialmente abiertas, con profundidad constante la respuesta resonante dependerá de la relación de aspecto y del ancho relativo de bocana. Los valores resonantes de $k \cdot l_x$

⁷¹ Puede interpretarse asimismo como un incremento en la inercia producido por la masa de agua exterior cerca de la bocana (Mei et al, 2005).

⁷² Tanto la fricción como la radiación exterior disipan la energía en las oscilaciones, sin embargo, en el caso de una dársena abierta las pérdidas internas para ondas estacionarias son despreciables frente a las pérdidas por radiación al exterior Miles y Munk (1961). Los valores de la amplificación obtenidos sin considerar disipación radiación exterior son cotas superiores no alcanzándose en la realidad.

decrecen con el ancho relativo de bocana (los periodos tienden a los de la dársena cerrada).

La Fig. II.16 representa el *factor de amplificación*, A , de los dos primeros modos resonantes respecto de la longitud relativa de la dársena $2 \cdot \pi \cdot (l_x/L)$ en función de la relación de aspecto y del ancho relativo de bocana⁷³.

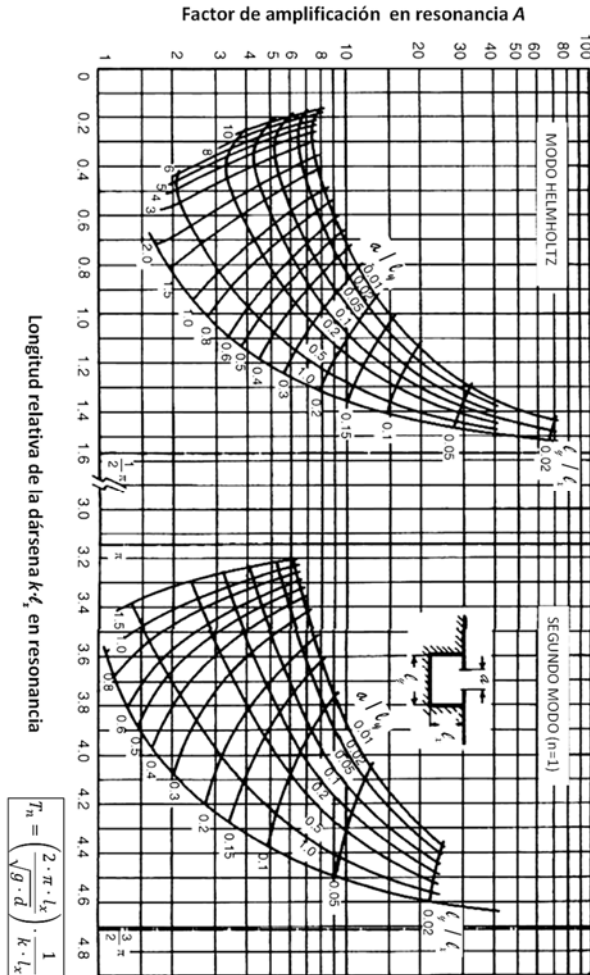


Figura II.16. Factor de amplificación de una dársena rectangular bidimensional parcialmente abierta en un extremo (adaptado de Sorensen y Thompson, 2008).

⁷³ Los valores representados no tienen en cuenta los efectos disipativos viscosos, por lo que serán cotas superiores de los que se observarían en la realidad (Sorensen y Thompson, 2008).

Para una dársena rectangular con un extremo completamente abierto y con profundidad constante, el factor Q tiene por valor:

$$Q = \frac{l_x}{l_y} \quad (II.49)$$

que implica que las mayores amplificaciones se producirán en las masas de agua largas y estrechas siempre que la causa de excitación persista en el tiempo más de Q/π ciclos.

Así pues, las características de la geometría bidimensional de la dársena afectan, por una parte a: 1) los periodos naturales de oscilación y 2) al factor de amplificación.

- *Canal rectangular bidimensional. Efecto de la variación de la profundidad y de la posición de la abertura.*

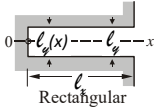
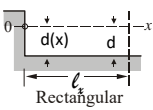
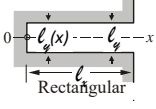
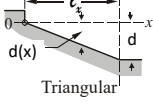
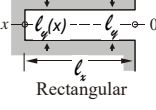
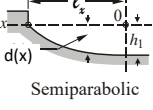
El efecto de la variación de la profundidad incrementa el factor de amplificación en más de 2 veces para el modo $m=0$ y en más de 4 para el modo $m=1$ con respecto del de la situación con fondo plano. Asimismo, los periodos resonantes se incrementan, asimismo, en más de un 20% para $m=0$ y en más del 60% para $m=1$ (Zelt, 1986).

La existencia de ondas transversales en puertos bidimensionales es producida por la falta de simetría. El desplazamiento de la abertura hacia el lateral en una dársena parcialmente abierta da lugar a modos de oscilación con componente en el eje y , pudiendo producirse nuevas situaciones resonantes así como variación en el factor de amplificación (Ippen y Goda, 1963).

- *Dársenas de formas geométricas simples*

Wilson (1972) obtuvo soluciones analíticas para varias dársenas de formas geométricas simples y profundidades variables. En la *Tabla II.6* se muestran las correspondientes a geometría rectangular con fondo constante, con talud uniforme y semiparabólico. Raichlen y Lee (1992) recopilan resultados obtenidos para puertos de geometría circular. Zelt (1986) obtiene resultados para 6 geometrías simples analizando el efecto de la variación lineal de profundidad sobre el factor de amplificación para los dos primeros modos resonantes.

Tabla II.6. Modos de oscilación en dársenas unidimensionales rectangulares con un extremo abierto (adaptado de Wilson, 1972).

Tipo de dársena		Periodos naturales de oscilación					
Descripción. Planta y perfil.	Fondo	Fundamental T_1	Valores de T_n/T_1 para modos				
			1	2	3	4	
 <p>Rectangular</p>	 <p>Rectangular</p>	$d(x) = d$	$2.000 \cdot \frac{2 \cdot L_x}{\sqrt{g \cdot d}}$	1.000	0.500	0.333	0.250
 <p>Rectangular</p>	 <p>Triangular</p>	$d(x) = d \cdot x/L$	$2.618 \cdot \frac{2 \cdot L_x}{\sqrt{g \cdot d}}$	1.000	0.435	0.278	0.203
 <p>Rectangular</p>	 <p>Semiparabolic</p>	$d(x) = d \cdot (1 - x^2/L^2)$	$2.220 \cdot \frac{2 \cdot L_x}{\sqrt{g \cdot d}}$	1.000	0.409	0.259	0.1889

- *Dársenas abiertas de forma circular conectadas entre sí y una de ellas abierta al exterior.*

Lee y Raichlen (1971) obtienen resultados de modelo numérico, sin considerar la fricción, de la respuesta de dársenas de forma circular conectadas entre sí y una de ellas abierta al exterior, alineadas y en ángulo recto (ver Figs. II.17 y II.18), respecto de la abertura al exterior.

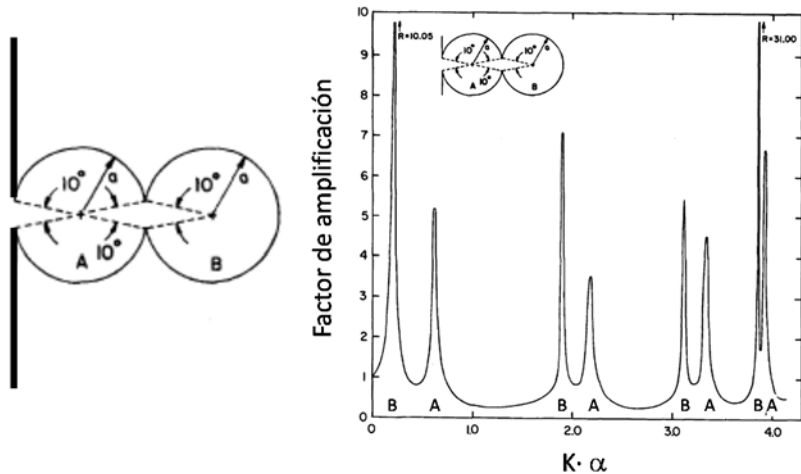


Figura II.17. Dársenas circulares alineadas y conectadas alineadas (Lee y Raichlen, 1971).

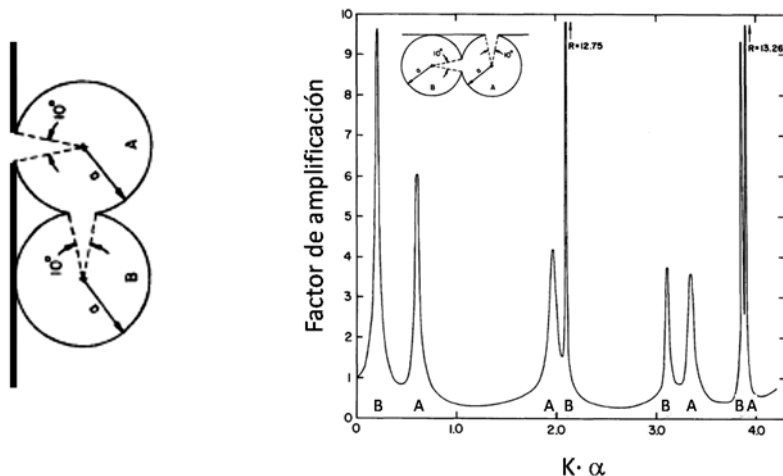


Figura II.18. Dársenas circulares alineadas y conectadas en ángulo (Lee y Raichlen, 1971).

II.2.3. Analogía con la teoría de circuitos para el caso general de dársenas interconectadas entre sí

El periodo de oscilación del sistema formado por un número cualquiera de dársenas conectadas puede abordarse mediante analogía con la teoría de circuitos a partir del concepto de impedancia⁷⁴ de un circuito eléctrico RLC⁷⁵ (Neumann, 1944; Miles, 1971) de forma más sencilla que empleando las ecuaciones de la hidrodinámica. La única limitación al método es que las dársenas sean rectangulares y la profundidad constante.

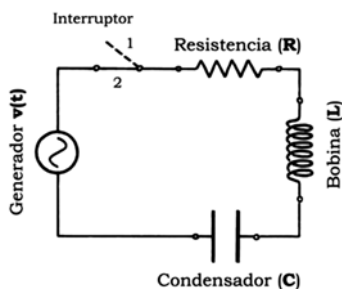


Figura II.19. Esquema de un circuito eléctrico RLC.

⁷⁴ La impedancia (Z) es una medida de la oposición que presenta un circuito al paso de una corriente cuando se aplica una tensión. La impedancia extiende el concepto de resistencia a los circuitos de corriente alterna, y posee tanto magnitud como fase. Se define como la relación entre el fasor tensión y el fasor intensidad de corriente.

⁷⁵ Circuito eléctrico RLC, formado por una resistencia (R), bobina (impedancia, L) y condensador (capacidad, C).

II.2.3.1. Circuito RLC

En un circuito RLC, como el de la *Fig. II.19*, al cerrar el circuito (posición 2 del interruptor), circulará por el circuito una corriente $i_{\sim}(t)$ alterna que provocará una respuesta transitoria inicial hasta que se alcance el régimen permanente de funcionamiento⁷⁶.

La ecuación que describe el comportamiento del circuito, tomando como variable la tensión en el condensador, es:

$$L_{\sim} \cdot C_{\sim} \cdot \frac{d^2 v_{\sim c}}{dt^2} + R_{\sim} \cdot C_{\sim} \cdot \frac{dv_{\sim c}}{dt} + v_{\sim b} = v_{\sim}(t) \quad (II.50)$$

con $v_{\sim}(t) = V_{\sim} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}$, $i_{\sim}(t) = I_{\sim} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t - \varphi}$ y φ el desfase entre el fasor tensión y el fasor corriente.

Los valores de tensión y corriente en el condensador son:

$$i_{\sim}(t) = C_{\sim} \cdot \frac{dv_{\sim c}}{dt} \quad (II.51)$$

con lo que la tensión en el condensador será:

$$v_{\sim c} = \frac{1}{C_{\sim}} \cdot \frac{1}{j \cdot \omega} \cdot e^{j \omega t - \varphi} \quad (II.52)$$

Con lo que la impedancia del circuito queda:

$$Z_{\sim}(t) = \frac{v_{\sim}(t)}{i_{\sim}(t)} = R_{\sim} + j \left(\omega \cdot L_{\sim} - \frac{1}{\omega \cdot C_{\sim}} \right) \quad (II.53)$$

II.2.3.1. Oscilación de una masa de agua con fricción

La ecuación del desplazamiento horizontal de las partículas de una masa de agua oscilando por la acción de una perturbación exterior es del tipo (*ver II.2.1.1, Ec. II.4 para la analogía mecánica*):

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2 \cdot \beta \cdot \frac{d\xi}{dt} + \omega_0 \cdot \xi = F_{ext} \cdot e^{j \omega_{ext} t} = f(t) \quad (II.57)$$

Que suponiendo una solución para la velocidad:

$$u(t) = \frac{d\xi}{dt} = U \cdot e^{j \omega_{ext} t + \varphi} \quad (II.58)$$

con U = amplitud de la velocidad horizontal.

El desplazamiento $\xi(t)$ queda:

$$\xi(t) = \frac{1}{j \cdot \omega_{ext}} \cdot U \cdot e^{j \omega_{ext} t + \varphi} \quad (II.59)$$

Quedando el término de impedancia del sistema Palomino et al, 2001:

⁷⁶ Al igual que en el caso del símil mecánico descrito en el *apartado II.2.1* cuando existe una acción exterior que se mantiene mientras tiene lugar la oscilación.

$$Z(t) = 2 \cdot \beta + j \left(w_{ext} - \frac{w_0}{w_{ext}} \right) \quad (II.60)$$

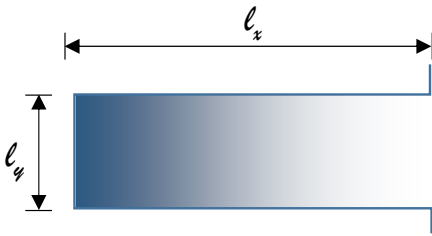



Comparando con la expresión obtenida para el circuito RLC, el término real es el disipativo, la resistencia R , para el circuito eléctrico y $2 \cdot \beta$ para la masa de agua⁷⁷.

Para el caso de una dársena rectangular de sección transversal uniforme, es posible demostrar (Miles, 1971) que la impedancia se define como:

$$Z = \frac{\text{amplitud de a presión}}{\text{sección transversal} \cdot \text{amplitud de la velocidad horizontal}} \quad (II.61)$$

Los valores de impedancia para las dársenas más habituales (Neumann, 1944) se representan en la *Tabla II.7*.

Tabla II.7. Impedancias para algunas dársenas con fondo constante (Palomino, 2001)

	<p>Dársena abierta en un extremo</p> $Z_1 = -j \cdot \frac{\rho \cdot \sqrt{g \cdot d}}{l_y \cdot d} \cdot \cot g \left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot l_x \right)$
	<p>Dársena abierta en ambos extremos</p> $Z_2 = j \cdot \frac{\rho \cdot \sqrt{g \cdot d}}{l_y \cdot d} \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot l_x \right)$
	<p>Canal estrecho doblemente abierto</p> $Z_3 = -j \cdot \frac{\rho \cdot \sqrt{g \cdot d}}{l_y \cdot d} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{L} \cdot l_y$
	<p>Dársena semicerrada ($b_{\text{bocana}} \ll b_d$)</p> $Z_4 = j \cdot \frac{\rho \cdot \sqrt{g \cdot d}}{l_y \cdot d} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot l_x}{L} - \frac{L}{2 \cdot \pi \cdot l_x} \right)$

⁷⁷ El término $Q=1/(2 \cdot \beta)$ es el denominado factor de disipación, *Q-factor* (Chen y Scawthorn, 2003) o "*quality factor*" (Rabinovich, 2009) que en resonancia iguala al factor de amplificación A .

II.2.3.2. Dársenas interconectadas

Al igual que en un circuito eléctrico, la impedancia de un sistema de dársenas interconectadas puede obtenerse asimilándolas a elementos de un circuito eléctrico. Así pues, con dársenas dispuestas en serie, la impedancia equivalente del sistema es:

$$Z = \sum_i z_i \quad (\text{II.62})$$

Y con dársenas dispuestas en paralelo:

$$\frac{1}{Z} = \sum_i \frac{1}{z_i} \quad (\text{II.63})$$

II.3. Experimentación física y numérica

Las formas geométricas sencillas, y de entre ellas la geometría rectangular es la más habitual de las masas de agua confinadas en recintos portuarios, sin embargo, hay dársenas con formas complejas distintas de las rectangulares y circulares. Asimismo, las masas de agua en los puertos pueden estar constituidas por sistemas de dársenas interconectadas, con distintos calados incluso con profundidad variable en la misma dársena. La dificultad en la estimación de la respuesta resonante mediante procedimientos analíticos hace preceptiva, generalmente, la aplicación de un modelo físico y/o numérico. También es habitual la modelización incluso con geometrías sencillas cuando se requieren resultados precisos o en casos de gran repercusión económica.

El mayor coste y necesidad de instalaciones para la modelización física junto con la mejora de las técnicas y herramientas numéricas motivó que, a finales del siglo XX, se especulase con la posibilidad de que los modelos numéricos sustituyeran a la modelización física a escala (Mansard y Miles, 2010). Además, en el caso de ondas de muy largo periodo los modelos numéricos pueden reemplazar a los modelos físicos a escala reducidas (Lillicrop, 1993) o incluso ser la única posibilidad de modelización en el caso de áreas portuarias muy extensas.

Sin embargo, frente al creciente número de problemas prácticos que pueden resolverse con modelos numéricos, la elevada complejidad de numerosos procesos físicos e hidrodinámicos sigue haciendo de la modelización física a escala reducida una herramienta de diseño irremplazable para la optimización de obras marítimas. Por otra parte, incluso los modelos numéricos que podrían reemplazar a los modelos físicos en determinados problemas marítimos complejos, siguen requiriendo una calibración previa que se obtiene, habitualmente, mediante modelización física a escala reducida⁷⁸.

⁷⁸ Zelt (1986) estudia el efecto de oscilaciones en dársenas con variación lineal de profundidad recalando la importancia de la experimentación física en la determinación del coeficiente de disipación en la bocana. Martínez y Naverac (1998) describen una extensa serie de experimentos realizados en modelos físicos a escala para el estudio

En consecuencia, la tendencia actual en fenómenos complejos como en el caso de las oscilaciones en puertos con geometrías complejas consiste en el empleo de modelos híbridos que combinan la modelización numérica en *campo lejano* con la física a escala reducida (Hughes, 1993; Lillycrop et al, 1993; Sorensen y Thompson, 2008)⁷⁹.

II.3.1. Experimentación física a escala reducida

La experimentación física para el estudio de oscilaciones portuarias puede tener por finalidad: 1) el estudio de situaciones simples o genéricas para investigar aspectos específicos o, 2) la reproducción a escala reducida de áreas portuarias con ánimo de solucionar problemas existentes o evaluar posibles modificaciones en construcciones portuarias existentes o futuras⁸⁰. Las primeras experimentaciones en laboratorio con puertos de geometría compleja para validar posibles geometrías que mejoren las condiciones portuarias frente a la resonancia fueron los desarrollados en 1945 para la Base de Operaciones Navales en Terminal Island (California, EEUU) y entre 1942 a 1951 para Table Bay (Cape Town, Sudáfrica), entre otros (Ippen y Goda, 1963). Biesel y Le Méhauté (1955) analizan los aspectos a considerar en la modelización de las oscilaciones de largo periodo en puertos. Iribarren et al. (1958) describe los ensayos de resonancia en dársenas cuadradas y rectangulares abiertas, realizados en modelo reducido destacando los efectos de la relación de aspecto, anchura relativa de bocana, profundidad y dirección de propagación en relación a orientación de la dársena⁸¹.

La distribución de presión para la onda larga es la hidrostática, asumiéndose que la distribución vertical de velocidad horizontal es uniforme, con lo que pueden utilizarse modelos geoméricamente distorsionados, con escalas vertical y horizontal diferentes. Los modelos distorsionados deforman la geometría adoptando una escala horizontal menor que posibilite la reproducción del área a modelizar en menor extensión, mientras que la mayor escala vertical permite una medición más precisa de las variaciones verticales de la superficie libre. Sin embargo, esta distorsión provoca efectos de escala adicionales (Hughes, 1993).

de la oscilación en puertos de geometría rectangular provocados por oleaje incidente de largo periodo con el objeto de estimar la pérdida de energía en la bocana.

⁷⁹ Por ejemplo, los modelos numéricos pueden auxiliar a la modelización física a escala para la estimación de los nodos de forma que no se dispongan sensores de nivel en dichos puntos o para establecer alternativas preliminares que se estudiarán con más detalle en modelo físico a escala (Sorensen y Thompson, 2008). Asimismo, la modelización física puede proporcionar los coeficientes de disipación a introducir en los modelos numéricos (Zelt, 1986).

⁸⁰ Kamphuis (2015) los denomina como "*Process Model*" y "*Design Model*", respectivamente.

⁸¹ En el artículo de referencia se puntualiza que, si bien los cambios de dirección ensayados modifican el factor de amplificación, dada la gran longitud de estas ondas, éstas llegan a la bocana prácticamente paralelamente a la costa. Asimismo, la reducida anchura de las bocanas respecto a la longitud de onda causa que la penetración de la onda tenga lugar en toda la bocana, por lo que la dirección de penetración es la de entrada al puerto aun cuando no coincida con la de la onda incidente.

Así pues, la modelización física para investigación de aspectos específicos, generalmente menor en su extensión, podrá modelizarse con escalas vertical y horizontal idénticas y típicamente bidimensional. Para la modelización de áreas portuarias extensas es habitual emplear modelos distorsionados.

Típicamente, las limitaciones a la modelización física incluyen: 1) coste, 2) necesidad de simular rugosidades para reproducir la disipación viscosa⁸², 3) generación mecánica de las ondas largas, y 4) las dificultades intrínsecas de la reflexión de las ondas largas pudiendo producir efectos indeseables.

II.3.1.1. Efectos de escala y de modelo

Las condiciones de semejanza que deben satisfacer los modelos de onda larga pueden obtenerse a partir de los coeficientes adimensionales independientes de las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento asociados a los términos de presión, aceleración no convectiva y tensión debida a la viscosidad Hughes (1993). Concluye que la semejanza sólo se consigue para los modelos sin distorsión de escala cuando se cumplen la semejanza de Froude y Reynolds simultáneamente.

Sin embargo, dado que la caracterización hidrodinámica de la onda larga depende principalmente de los efectos de inercia y gravedad, la modelización a escala reducida puede llevarse a cabo con la semejanza de Froude, aunque es probable que los efectos viscosos y debidos a la fricción tengan cierta relevancia al no estar adecuadamente escalados. Ippen and Raichlen (1962) y posteriormente Ippen y Goda (1963) muestran diferencias entre los resultados de experimentación física a escala y teóricos, posiblemente atribuidos a la disipación turbulenta en dársenas acopladas y en la entrada de la dársena en dársenas parcialmente abiertas, respectivamente (Zelt 1986). En la misma línea de resultados, Lee (1969) describe experimentos realizados en dársenas de geometría rectangular y circular, así como el dársenas del Puerto de Long Beach (California, EEUU) encontrando diferencias en el factor de amplificación respecto de los resultados teóricos. Lee y Raichlen (1971) comprueban experimentalmente que como primera aproximación, la respuesta de un sistema de dársenas puede estimarse a partir de las respuestas de las dársenas individuales⁸³, si bien incide en la problemática de la disipación viscosa en condiciones de resonancia y en los efectos de escala.

Si las velocidades en el modelo son reducidas, la capa límite turbulenta que tendría lugar en el prototipo puede no desarrollarse en el modelo, con el consiguiente efecto de escala. Esta situación puede corregirse en el modelo incorporando rugosidad artificial⁸⁴. Así pues, la fricción puede disipar más energía en el modelo que en el

⁸² Dependiendo de la escala del modelo.

⁸³ Con cierto efecto de la influencia de la oscilación de una dársena en la otra dársena (Lee y Raichlen, 1971).

⁸⁴ Pese a no ser una semejanza exacta, la incorporación de rugosidad artificial en el modelo representa con mayor aproximación los procesos en prototipo que en el caso en que se desarrollase un flujo laminar. Yallin (1971) obtuvo teóricamente la relación de escala a partir de la suposición de la forma de la capa límite turbulenta (Hughes, 1993).

prototipo provocando diferencias en la disipación de la energía de la onda larga y en la altura de las oscilaciones. En los prototipos en los que se desarrollen capas límites turbulentas con gran posibilidad de disipación de energía deberán simularse rugosidades equivalentes en el modelo o emplear mayores escalas que minimicen el efecto de escala de la viscosidad y la fricción (Lee y Raichlen, 1971).

La generación de ondas largas en laboratorio necesita que el desplazamiento del generador sea mucho mayor que el requerido para generar oleaje. Además, si se plantease la utilización de sistemas de absorción activa de ondas⁸⁵, dicho desplazamiento debería ser aún mayor que en el caso sin absorción. En cualquier caso, es difícil generar ondas armónicas progresivas de amplitud finita en un canal de ensayos con poca profundidad. Incluso cuando el movimiento del generador es sinusoidal las ondas generadas en el canal en diferentes posiciones a lo largo del mismo difieren del perfil sinusoidal de forma acusada, probablemente debido a la no linealidad (Mei et al, 2005b, Goda 2010).

Por otra parte, los efectos de modelo en la experimentación física a escala de las oscilaciones portuarias habitualmente están condicionados por la necesidad de generar ondas largas en recintos cerrados en el modelo. Las ondas largas reflejan la mayor parte de su energía en los contornos en mayor medida que el oleaje⁸⁶, haciendo más difícil la simulación de contornos absorbentes como los que existirían en mar abierto. Para ello se utilizan elementos que amortiguan la energía, como taludes, mallas o pantallas perforadas que son poco eficaces para la onda larga, ocupando una gran superficie de las instalaciones del canal 2D o tanque 3D de ensayos.

Asimismo, también deben evitarse zonas con pérdidas o filtraciones que no existan en el prototipo y que puedan provocar variación del nivel medio o disipación de energía no deseada. El fondo del canal debe sellarse⁸⁷, al igual que los perímetros que no deban transmitir energía al exterior del sistema.

II.3.2. Experimentación numérica.

El estudio de la resonancia para el diseño portuario empleando modelización numérica se puede llevar a cabo mediante dos estrategias diferentes (Bellotti, 2007). La primera modeliza, generalmente con ecuaciones tipo Boussinesq, los procesos de generación de ondas largas a partir de la propagación y rotura de oleaje de corto periodo y posterior propagación y resonancia de las ondas de largo periodo así

⁸⁵ La mayoría de los sistemas requieren que la longitud de onda sea menor que la de la instalación.

⁸⁶ Es habitual considerar la costa como un contorno reflejante en la modelización de ondas largas, con referencias a trabajos experimentales de Horikawa y Ishimura (1970), Lee (1971), Lee y Raichlen (1972), Miles y Lee (1975), entre otros (Sorensen, 2008).

⁸⁷ Keulegan (1959) y Zelt (1986) referencia el uso de Lucite®, un polimetilmetacrilato y sellantes para el modelo y las juntas del canal de ensayos.

formadas en el interior del puerto (Nwogu, 2000; Woo y Liu, 2004; Losada y otros, 2004 y Kofoed-Hansen, 2005).

La segunda se basa en la evaluación de la respuesta del puerto frente a ondas de largo periodo a partir de la modelización, mediante el uso de aproximaciones lineales con ecuaciones de tipo elíptico, típicamente, de la amplificación de las mismas en el interior del puerto en condiciones estacionarias. De esta forma, generalmente mediante combinaciones de frecuencias y direcciones con amplitud unidad es posible determinar los oleajes que más se amplifican y así obtener una estimación de los modos de oscilación más problemáticos (Mei, 1983; Chen y Houston, 1987 y Demirbilek y Panchang, 1998).

Esta segunda estrategia, adolece de la habitual carencia de información acerca de la probabilidad de presentación de las frecuencias analizadas. Esta indeterminación puede solventarse⁸⁸ aproximadamente a partir de las correlaciones con la probabilidad asociada al oleaje generador con expresiones como la de Medina (1990), Bowers (1992) o Stiassnei y Drimer, (2006).

Así pues, existen diferentes modelos numéricos referenciados en la literatura para hacer frente a las necesidades descritas en las dos estrategias anteriores: 1) modelos para la propagación del oleaje (algunos con mecanismos para la simulación de la generación de ondas de infragravedad) y posterior transformación hasta el puerto y 2) modelos para la obtención de la respuesta de las ondas largas en el interior del puerto.

En cuanto a las técnicas numéricas (Demirel y Wang, 1986) que tradicionalmente se citan para el estudio de oscilaciones portuarias, éstas son (Raichlen, 1992): a) las diferencias finitas, b) los elementos finitos, y c) los elementos de contorno Yalciner, (2007). Otras técnicas, con un coste computacional menor, como las basadas en redes neuronales, pueden ser de aplicación cuando se disponen de datos suficientes para calibrar los modelos (López e Iglesias, 2013).

Hay que considerar que pueden haber fenómenos como el rebase, transmisión de energía a través de estructuras no consideradas habitualmente en los modelos (Thompson y Hadley, 1995).

Es de destacar, cómo la modelización numérica puede convertirse en una herramienta de gran potencia (Diaz et al., 2011 y 2015) para la creación de bases de datos integrales para la explotación portuaria y navegación marítima como es el caso del proyecto MARUCA (2009). Este proyecto desarrollado por la Universidad de Cantabria y Aquatica, permite el acceso universal vía web a las librerías de propagación de oleaje, así como al clima marítimo en el entorno de los puertos de

⁸⁸ También pueden emplearse, como paso previo, modelos no lineales de interacción de oleaje para la simulación de la generación de ondas de infragravedad en dos modelos, el primero proporcionando las entradas para el segundo). Es equivalente a la modelización descrita en la primera estrategia citada en el texto.

interés general de Puertos del Estado incluyendo la caracterización de la onda larga⁸⁹ así como información sobre las características resonantes de estos puertos a partir de modelos numéricos.

II.3.2.1. Modelos de propagación de ondas

La propagación del oleaje en zonas de aguas con poca profundidad puede simularse con modelos que resuelven las ecuaciones de: 1) equilibrio de energía espectral promediando la fase y, 2) cantidad movimiento y continuidad en la fase.

Los modelos que promedian en la fase pueden aplicarse a zonas extensas pero con limitaciones en su aplicación a zonas de profundidad reducida⁹⁰. Estos modelos asumen que los cambios en las propiedades de la onda varían ligeramente en distancias del orden de una longitud de onda, por lo que no pueden resolver con precisión los cambios que se producen por la difracción y la reflexión. Aunque pueden aplicarse mejoras para su aplicación a situaciones que exceden las limitaciones descritas⁹¹, no son aplicables al estudio de oscilaciones portuarias.

Los modelos que resuelven en la fase son más fiables en el modelado del oleaje en zona de generación de viento, aunque son aplicables a áreas más reducidas. En esta categoría se encuentran los no dispersivos⁹² y los dispersivos en frecuencias.

Los modelos con dispersión frecuencial se clasifican, con generalidad en modelos basados en la ecuación de la pendiente suave de Berkoff (lineales) y modelos de Boussinesq (no lineales). Ambos se basan en ecuaciones integradas en la vertical para la propagación en un plano bidimensional horizontal.

Los modelos lineales basados en la ecuación de Berkoff⁹³, dispersivos en frecuencias, que resuelven en la fase, se aplican al estudio de la agitación y resonancia en puertos con geometría irregular batimetría variable con talud moderado⁹⁴ (Lee, 1998; Xing et al, 2010).

⁸⁹ a partir de modelado numérico, campañas de campo (medidas de nivel y velocidad) y monitorización permanente mediante sistemas de cámaras de video. Díaz-Hernández et al. (2015) plantea la estimación de las características de la onda de infragravedad analíticamente siguiendo a Hasselmann (1962) y Okihiro(1992).

⁹⁰ Los modelos que promedian la fase se basan en el criterio de Courant para la estabilidad numérica, por lo que a medida que la profundidad se reduce los pasos de tiempo que se necesitan se hacen más pequeños incrementando el coste computacional.

⁹¹ Modelos como el SWAN (Booij et al, 1996), el STWAVE (Resio, 1988) incorporan estas mejoras.

⁹² Los modelos no dispersivos frecuentemente pueden clasificarse en función de la linealidad de sus ecuaciones en modelos lineales o débilmente no lineales. Éstos últimos, se subdividen por la forma en que analizan la propagación de la función de densidad de probabilidad del oleaje en la propagación, en probabilísticos (que aplican métodos de Montecarlo) y espectrales (dividiendo en componentes el espectro). El modelo OLUCA del IH Cantabria es un ejemplo de modelo espectral no dispersivo que resuelve en la fase (GIOC, 2000).

⁹³ Modelos como el CGWAVE (Demirbilek, y Panchang. 1998), el MSP (Behrendt, 1984) o PHAROS (Deltares, 2013) son ejemplos de este tipo.

⁹⁴ Estrictamente, la ecuación de Berkoff es aplicable a fondos con pendientes que no superen la relación 1/3 (vertical/horizontal).

Los modelos no lineales, empleando ecuaciones de Boussinesq⁹⁵, dispersivos en frecuencias, que resuelven en la fase, al incluir la dispersión en amplitudes y frecuencias, son de aplicación para la simulación de las transformaciones de oleaje direccional irregular no lineal en profundidades reducidas (Abbot et al, 1978). Son los modelos a emplear para la simulación de la generación de ondas de infragravedad a partir de oleaje integrando la propagación hacia y en el interior del puerto. Asimismo, también incluyen la transmisión de energía entre distintas frecuencias también en el interior del puerto⁹⁶.

II.3.2.2. Modelos para la obtención de la respuesta resonante de las ondas largas en el interior de recintos

Los modelos que permiten obtener la respuesta resonante de masas de agua en el interior de recintos son, como se ha visto en el apartado anterior:

- *Modelos con ecuaciones tipo Boussinesq*: en los que se introduce el oleaje exterior y el modelo simula las interacciones no lineales que generan las ondas de infragravedad y propaga todas las ondas hacia y en el interior del puerto obteniendo la respuesta resonante del mismo de forma integrada⁹⁷.
- *Modelos basados en la ecuación de la pendiente suave*: obtiene la respuesta resonante del puerto con limitaciones en la pendiente del fondo a partir de los datos de las ondas de infragravedad en las proximidades de la bocana.

A estos modelos se les pueden añadir (Thotagamuwage, 2014):

- *Modelos basados en la ecuación de Helmholtz*: que permiten obtener la agitación y resonancia en puertos con profundidad constante (Lee, 1971).

Con generalidad, los modos resonantes de dársenas de formas irregulares o complejas pueden ser obtenidos mediante modelos numéricos que emplean las ecuaciones de la onda larga para obtener la elevación de la superficie libre y las velocidades horizontales en un dominio de cálculo mallado que abarca la dársena o puerto. Básicamente consiste en dividir el dominio con una malla horizontal y resolver, secuencialmente, las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento de la onda larga en cada rectángulo de la malla en intervalos de tiempo sucesivos.

En la modelización numérica de áreas portuarias, no suelen considerarse los términos de la aceleración de Coriolis, ni los correspondientes a las aceleraciones convectivas

⁹⁵ Los modelos BOUSS-2D (Nwogu y Demirebilek, 2001), MANOLO (Losada et al, 2008), MIKE21-BW (Sorensen et al, 2004) son ejemplos de este tipo.

⁹⁶ Iwagaki y Murakami (1972) investigaron en modelo reducido a escala la interacción no lineal entre los diferentes armónicos de un espectro de onda larga que explicaban las diferencias en las respuestas de dársenas rectangulares estrechas con profundidad constante respecto de las soluciones numéricas por superposición

⁹⁷ Combinando la modelización tipo Boussinesq de un puerto con técnicas de optimización, es posible plantear metodologías para la obtención de la geometría óptima que minimice los efectos resonantes (Cortínez et al, 2014).

de las ecuaciones de la cantidad de movimiento. Asimismo, suele despreciarse la tensión superficial aunque manteniendo el término de fricción en el fondo.

En los contornos impermeables se define como condición de contorno la condición de flujo nulo. En la bocana, la condición de contorno la constituye la condición de oleaje incidente.

Es habitual, en los modelos más sencillos, adoptar las hipótesis de fluido no viscoso e irrotacional. Los valores máximos de las amplitudes, para los periodos resonantes, crecerían muy por encima de su valor real⁹⁸ (Paradoja del Puerto o *Harbour Paradox*), no realistas al no considera las pérdidas por fricción en los contornos y en la bocana (Miles y Munk, 1961). Sin embargo, la estimación de la forma de la resonancia y periodo resonante sería correcta. La incorporación de mecanismos de disipación de energía que simulen las pérdidas en bocana y las fricciones en fondo y laterales hace desaparecer la paradoja (Unluata y Mei, 1975; Kostense et al, 1986).

II.3.2.3. Transitoriedad de la respuesta portuaria frente a las ondas largas

Otro aspecto relevante, independiente de las pérdidas de energía, es la transitoriedad del proceso (no considerada en los modelos elípticos) en términos de energía. Las mediciones de campo indican que esta variación en el tiempo puede ser relevante, con intervalos del mismo orden de variación en amplitudes, que en periodos (Lara et al, 2004), con lo que la hipótesis de estacionariedad comúnmente aceptada para oleaje de corto periodo puede no ser adecuada para ondas largas.

En referencia a la influencia de la transitoriedad del proceso, Belloti (2007) demuestra en una aplicación al caso del Puerto de Ostia (Italia) que, la persistencia de la acción exterior necesaria para producir la excitación de los modos resonantes con mayor amplificación dentro del puerto requeriría tanto tiempo⁹⁹ que, desde un punto de vista ingenieril práctico, los modos más problemáticos podrían ser otros aparentemente menores pero que podrían excitarse más rápidamente y por lo tanto con mayor probabilidad.

II.4. Datos en prototipo.

La resonancia puede reducir la operatividad portuaria y provocar problemas de seguridad en los puertos. Afortunadamente, la resonancia portuaria no es un fenómeno muy frecuente, aunque es ampliamente citada debido a su trascendencia (Rabinovic, 2009).

⁹⁸ Desde un punto de vista práctico, las pérdidas en la entrada pueden ser poco importantes si las amplitudes de las ondas de largo periodo son pequeñas (del orden de 10 veces inferiores) en comparación con la profundidad (Unluata y Mei, 1975), por lo que los resultados de los modelos no viscoso pueden considerarse un límite superior (aunque razonable).

⁹⁹ Relacionado con el valor de Q/π ciclos de actuación de la acción exterior para activar los modos resonantes (ver apartado II.2.2.2)

En 1948, Iribarren y Nogales relatan las “numerosas observaciones efectuadas en las dársenas de los pequeños puertos pesqueros guipuzcoanos” de *ondas de resaca*, “fácilmente medible en sus bocas, donde son máximas”. Sin embargo, en general, la disponibilidad de medidas es escasa y existe falta de consenso en la metodología para la caracterización de las ondas largas que provocan la resonancia y sus efectos (Martín-Soldevilla, 2003). La dependencia de la resonancia de la profundidad¹⁰⁰ y por lo tanto de las variaciones de nivel asociadas a fenómenos meteorológicos o astronómicos de muy largo periodo puede dificultar aún más el análisis.

Frente a la escasez de registros útiles de ondas de infragravedad, es frecuente disponer de datos de oleaje. Las características de la onda de infragravedad pueden estimarse a partir de los datos de oleaje partiendo de bases analíticas (Medina, 1990; Bowers, 1992; Staniassnie y Drimer, 2006) o empíricas (Vis, 1985; Nelson et al, 1988; Bowers, 1992; Lara 2004; Melito et al., 2007; Bellotti y Franco, 2011). Típicamente, la expresión que relaciona la altura de onda de infragravedad con la altura y periodo de pico del oleaje es del tipo (ver *apartado II.1.3*):

$$H_S^{IG} = K \cdot \frac{H_S^{A_1} \cdot T_p^{A_2}}{d^{A_3}} \quad (\text{II.64})$$

donde d es la profundidad, y K , A_1 , A_2 , y A_3 son parámetros que se ajustan a los desarrollos teóricos o empíricamente a las mediciones de una localización concreta (ver *Tabla III.3*).

Las escasas mediciones disponibles asociadas a estudios de resonancia en puertos, [Esperance harbor en Australia (Morison y Imberger, 1992), Barbers Point harbor en Hawaii (Okiihiro et al., 1992 y 1993; Harkins y Briggs, 1995; Okiihiro y Guza, 1996), Marina di Carrarra en Italy (Bellotti y Franco, 2011) y Puerto del Ferrol en España (López et al., 2012)] confirman la existencia de una marcada correlación entre las ondas de infragravedad en el interior de los puertos y el oleaje de fondo en el exterior del puerto (Thotamagawe, 2016).

En los últimos años, el incremento en la frecuencia de muestreo en las redes de medida para las variaciones de nivel del mar hace posible emplear los datos de nivel del mar para el estudio de ondas largas (Bressan y Tinti, 2016). Sin embargo, es habitual que este tipo de datos se analicen únicamente en el caso de sucesos extremos como *tsunamis* (Rabinovich y Thompson, 2007; Bressan y Tinti, 2011; Rabinovich et al., 2013) o problemáticas locales.

II.4.1. Casos de mediciones en prototipo asociados a problemáticas locales portuarias

Rabinovich (2009) incluye una lista de puertos con ondas de resaca frecuente: Ciutadella (España), Ciudad del Cabo (Sudáfrica), Los Angeles (EEUU), Dakar

¹⁰⁰Iribarren y Nogales, en 1948 hacien referencia a la relevancia del calado en las ondas de resaca en las observaciones en puertos pesqueros guipuzcoanos.

(Senegal), Toulon y Marsella (Francia), Alger (Algeria), Tuapse y Sochi (Rusia), Batumi (Georgia) y Esperance (Australia).

A la anterior lista puede añadirse la relación recopilada en la *Tabla II.7*, no completa, de casos referenciados en la literatura científica en los que se han efectuado campañas de medición para estudiar las características resonantes/de onda larga en puertos, bahías y estuarios. Las características de la respuesta resonante están condicionadas por la geometría en planta y fondo locales (o regionales) en que oscilan las masas de agua confinadas, si bien, las condiciones que las provocan dependen de acciones externas de ámbito superior al local (ver *apartado II.1*)

Tabla II.8. Periodos de onda larga medidos en estudios de resonancia de puertos y bahía.

<i>Puerto</i>	<i>País</i>	<i>T [s]</i>	<i>T [x60 s]</i>	<i>T [x3600 s]</i>
Puerto Esperance	Australia	40, 80, 40-180		
Puerto Geraldton	Australia	45, 65, 90 ^a (34, 43, 45 y 48) ^b	20-40 costa oeste ^a	
Marina Two Rocks	Australia	61, 98, 124, 227		
Puerto Longkou	China		50-160	
Puerto Gamcheon	Corea		27-33 (fundamental), 9.4, 12.1, 5.2-6.2 ^a	
Nuevo Puerto Pohang	Corea	42, 54, 60	8, 23, 33, 80	
Nuevo Puerto Pusan	Corea	60-150		
Puerto Muko	Corea	60-300 (Estación 3)	18-28 (Estación 1) 13-20 (Estación 2) 11 (Estación 3)	
Puerto de Chania	Creta	480		
Puerto Ploce	Croacia		25-30	
Puerto Split	Croacia		7	
Puerto de Bilbao	España	40-70, 100-150, 250-350 (exterior) 40-180, 280-370 (interior)		
Puerto del Ferrol	España	83, 103, 134, 171, 221, 264, 314	9.7, 17, 27, 68	
Puerto de Gijón	España	75-90, 130-200 (60-400)		
Puerto de Málaga	España		6-7, 16.5 , 20.9, 35.6	
Puerto de Crescent city	EEUU		22 (fundamental)	
Puerto de Long Beach	EEUU	135, 170, 320-340, 640-680 (fundamental)	60 (fundamental)	
Puerto de Long Beach	EEUU	60, 72, 90, 102	60 (Berth 174) casi a diario 13.3 (Berth 211)	
Bahía de San diego	EEUU	160-170 (Pier alpha) ^a 240 (Broadway Pier) ^a	21-25 (regional)	
Grandes lagos	EEUU			5.3, 1.8, 1.44 , 1 y 0.85 en Pentwater ^a
Puerto de Barbers Point	Hawai (Oahu)	70-140		

Tabla II.8 (Cont) Periodos de onda larga medidos en estudios de resonancia de puertos y

<i>Puerto</i>	<i>País</i>	<i>T [s]</i>	<i>T [x60 s]</i>	<i>T [x3600 s]</i>
Marina di Carrara	Italia	33-333 (66-200)		
Siracusa	Italia	60-72, 150-180, 245, 270, 315, 360	7.6, 9.6, 11-12.5, 19.5, 21.2-21.8	
Puertos de Tomakomai, Kashima, Noshiro, Shibushi	Japón	60-300	30	
Puerto de Sendai	Japón	45-165		
Bahía de Urauchi	Japón		24.9 (fundamental), 7.2, 12.6	
Puerto de Larache	Marruecos		17.5, 70	
Bahía de San Nicolas	Peru	60-180		
Bahía de Luanda (previa a la construcción del puerto)	Portugal	110-150		
Puerto de Sines	Portugal			
Puerto de Table Bay	Sudáfrica	50-110 ^b	11, 5.5 ^a	
Puerto de Hualien	Taiwan	100-160		

Cabe destacar, el *Simposio para la atenuación de onda larga* (Mid West Port Authority, 2016) celebrado en Geraldton (Australia) en 2014. El puerto de Geraldton sufre fenómenos resonantes desde su construcción¹⁰¹, habiéndose efectuado campañas para el estudio de las ondas largas asociadas y respuesta resonante del puerto durante más de una década. Como resultado del mismo, se presentaron 11 ponencias relacionadas con el análisis de las mediciones y propuesta de soluciones. Asimismo, como conclusión, la autoridad portuaria organizadora se propone a corto plazo continuar con las mediciones de las oscilaciones y efectuar seguimiento del movimiento de las embarcaciones en tiempo real.

II.5. Resumen y conclusiones del Capítulo II.

En este capítulo se ha analizado el problema de la resonancia en puertos con especial interés en los procedimientos para la determinación de las frecuencias naturales de oscilación y respuesta resonante de dársenas y puertos, incidiendo en los mecanismos de generación de las ondas de infragravedad como principal agente desencadenante de los procesos resonantes en los puertos. Se presentan, a continuación, los principales resultados obtenidos en el presente capítulo, destacando los que se consideran relevantes para el desarrollo de la presente investigación y que desarrollarán en los posteriores capítulos.

Se han clasificado las oscilaciones del nivel del mar en función de su frecuencia y del mecanismo de generación. La fuente que provoca la generación determina el rango de frecuencias de las mismas en origen. Sin embargo, es la geometría de la masa de agua que oscila la que controla las frecuencias libres resonantes, con lo que, diferentes fuentes producen oscilaciones resonantes en el mismo rango de frecuencias y, por lo tanto, la misma fuente puede producir oscilaciones resonantes de distintas frecuencias dependiendo de dónde tienen lugar. Típicamente, las ondas

¹⁰¹Con frecuentes roturas de amarras.

largas en su propagación concentran sus frecuencias en aquellas frecuencias asociadas a las naturales controladas por la geometría local definida por la geografía y batimetría. Así pues, dadas las dimensiones habituales de las dársenas comerciales y de los buques, las ondas de infragravedad se muestran como las más proclives a la resonancia con las frecuencias naturales de las dársenas¹⁰².

El análisis de los mecanismos de generación de las ondas de infragravedad, reforzado por las observaciones del fenómeno de la resonancia que se citan en la literatura científica, indican que los procesos asociados a las ondas de infragravedad sólo se manifiestan en forma de onda estacionaria cuando tiene lugar la condición de resonancia en dársenas y bahías.

Si el proceso de resonancia es controlado por la geometría de la masa de agua que oscila, la determinación de los periodos naturales de oscilación y de los factores de amplificación son parámetros fundamentales para el futuro diseño específico de un elemento antirreflejante para una dársena o puerto concreto. Analíticamente, los diferentes enfoques en el análisis¹⁰³ han abarcado desde la analogía mecánica hasta la eléctrica, pasando inevitablemente por el estudio hidrodinámico. Se presentan las soluciones analíticas obtenidas para geometrías sencillas, definiéndose las variables más habituales en dársenas portuarias con efecto en la respuesta resonante, como son la abertura relativa y la relación de aspecto, la excentricidad en la ubicación de la bocana y la variación de profundidad. Asimismo, si bien la determinación de los periodos naturales de oscilación puede considerarse aceptable, se destaca el papel de los mecanismos de disipación en la indeterminación de la amplificación producida en la resonancia¹⁰⁴, fricción, viscosidad y radiación de energía al exterior de la bocana.

La modelización numérica o a la modelización física a escala reducida es necesaria para el estudio de geometrías más complejas y batimetrías irregulares, si se precisa una evaluación más realista del coeficiente de amplificación¹⁰⁵.

Los mecanismos de disipación que emplean los elementos antirreflejantes tipo Jarlan para la absorción el oleaje que se proponen en la presente investigación para la atenuación de la onda de infragravedad son *fenómenos complejos* que precisan de la modelización física a escala, al menos, en una etapa inicial en la que se evalúe su eficiencia mediante la obtención del coeficiente de reflexión equivalente que permita su posterior inclusión en un modelo numérico típico de resonancia.

La literatura científica revisada alerta de los posibles efectos de modelo y efectos de escala en la modelización física a escala reducida de los fenómenos de resonancia

¹⁰²En los capítulos posteriores de la presente investigación, se restringirá el rango de periodos a estudiar para la atenuación de la onda larga a los comprendidos en el rango de la infragravedad ($30 < T_p [s] < 300$).

¹⁰³Se ha descartado a analogía acústica por la menor precisión en los resultados.

¹⁰⁴Uno de cuyos resultados más conocidos es la denominada *paradoja del puerto*, o "*harbor paradox*", expuesta por Miles y Munk en 1961.

¹⁰⁵Que incluyan los mecanismos de disipación que tienen lugar en la realidad.

provocados por onda larga, como pueden ser la generación de las ondas, las reflexiones y pérdidas de energía no deseadas, así como los derivados de los efectos viscosos y fricción. Éstos deberán tenerse presentes en el capítulo de modelización física a escala de las estructuras antirreflejantes propuestas (ver *Capítulo V*) para la atenuación de las ondas largas en los procesos resonantes.

Por último, se ha destacado la importancia de las campañas de medición de ondas largas en puertos, bahías y ensenadas, indispensables en aquellos casos en los que se desea el mejor conocimiento de las ondas largas, los procesos resonantes existentes y sus características. La disponibilidad de datos de campo, además de permitir la calibración más precisa de los distintos modelos, posibilita la caracterización de la onda larga¹⁰⁶ el empleo otros modelos numéricos basados en técnicas de inteligencia artificial como es el caso de las redes neuronales.

¹⁰⁶ Existen expresiones teóricas y empíricas para intentar caracterizar la onda larga a partir de las características del oleaje, pero la gran variabilidad existente apunta a la necesidad de la caracterización mediante campañas de medida.

CAPÍTULO III

Estructuras antirreflejantes para atenuar las ondas en los puertos

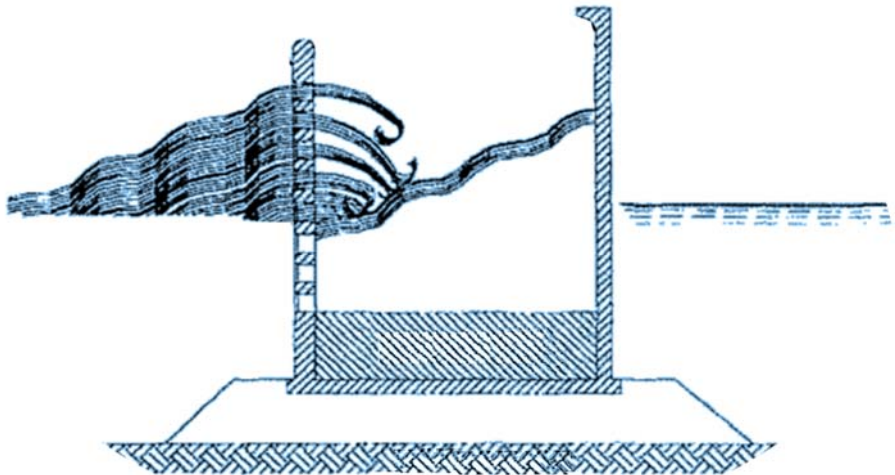


Ilustración en Gomi et al. (2002)

La resonancia en puertos produce amplificación de las oscilaciones de la masa de agua confinada en éstos, como consecuencia de la proximidad entre las frecuencias de oscilación naturales de la misma y las frecuencias de las ondas largas que transmiten la energía, desde exterior a la masa de agua interior del puerto. Esta amplificación, produce variaciones de nivel que pueden ser máximas junto a los paramentos reflejantes y corrientes con direcciones definidas, variando el sentido de las mismas con la oscilación. Los efectos de las variaciones de nivel abarcan, desde la pérdida de operatividad de las operaciones marítimas, hasta inundaciones por rebase en las áreas próximas a las dársenas. Las corrientes, también con influencia en la operatividad, pueden provocar excesivas tensiones en los amarres que provoquen su rotura, así como movimientos extraordinarios de las embarcaciones con riesgo de colisión entre ellas.

Las medidas para evitar, corregir o reducir, a niveles admisibles, los efectos producidos por los episodios resonantes, generalmente pasan por considerar modificaciones en la geometría del propio puerto o dársena¹⁰⁷. En el diseño de un nuevo puerto o en la modificación o ampliación de un puerto existente, los estudios de agitación interior y de resonancia, analizan diferentes geometrías con el objetivo de minimizar el riesgo asociado. Sin embargo, en puertos ya construidos que presentan problemas de resonancia, las propuestas de cambio de geometría, generalmente son descartadas por el elevado coste económico que representan¹⁰⁸. Las medidas paliativas típicas son (Díaz-Hernández et al, 2016): 1) prolongación de los diques de abrigo¹⁰⁹, 2) mejoras en el sistema de amarre, 3) adopción de sistemas de alerta y 4) incorporación de elementos para la absorción de la onda larga en el interior del puerto.

La presente investigación plantea como objetivo la evaluación de la eficiencia de las estructuras antirreflejantes para la atenuación de la resonancia en puertos, en general, particularizando el análisis para estructuras definidas a partir de los mecanismos de disipación que se encuentran en las estructuras para la absorción de la energía del oleaje del tipo Jarlan (1961). Consiguientemente, tras abordar el problema de la resonancia en el capítulo precedente, es procedente en el presente capítulo analizar el estado del arte en relación a los distintos tipos de elementos antirreflejantes basados en la tipología Jarlan para la absorción del oleaje y las diferentes tipologías de elementos para la atenuación de la onda larga en el interior del puerto.

¹⁰⁷La definición del puerto en planta puede ser propuesta como un problema matemático que proporciona como solución la geometría óptima a partir de modelos numéricos tipo Boussinesq (Cortínez et al, 2014).

¹⁰⁸Estructura marítima vertical semejante a un cajón, con paramento frontal vertical perforado que define una cámara hueca entre el paramento perforado frontal y el paramento completamente reflejante final.

¹⁰⁹Scott et al, investigan en *Mid West Ports* (2016) las alternativas para la reducción de los efectos de la resonancia a niveles admisibles para el caso del puerto de Geraldton (Australia) concluyendo que la solución técnica más efectiva (la extensión de los diques de abrigo) no es necesariamente la que produce la mayor tasa de retorno, en términos económicos.

III.1. Aspectos básicos del equilibrio de energía en la interacción de ondas y estructuras.

La presencia de estructuras marítimas transforma la energía de las oscilaciones de las masas de agua confinadas en los puertos en función 1) de la tipología y disposición en planta de las estructuras y 2) de las características de la oscilación. La interacción de las estructuras marítimas convierte la energía incidente en a) energía reflejada, b) energía transmitida, a través o sobre la estructura, c) energía disipada y d) energía transferida a otros modos oscilatorios.

La ecuación de la conservación de la energía del movimiento oscilatorio junto a una estructura marítima puede expresarse¹¹⁰:

$$E_{inc} = E_{ref} + E_{trans} + E_{dis} \quad (III.1)$$

donde E_{inc} , E_{ref} , E_{trans} y E_{dis} son las energías incidente, reflejada, transmitida y disipada, respectivamente.

Aceptando la relación entre la energía del oleaje y el cuadrado de la altura de onda, y definiendo los coeficientes de reflexión y de transmisión:

$$C_r = \frac{H_{ref}}{H_{inc}} \quad (III.2)$$

$$C_{trans} = \frac{H_{trans}}{H_{inc}} \quad (III.3)$$

Sustituyendo en la Ec. III.1, el término de disipación, C_d , queda¹¹¹:

$$C_{dis}^2 = 1 - \left(\frac{H_{ref}}{H_{inc}}\right)^2 - \left(\frac{H_{trans}}{H_{inc}}\right)^2 = 1 - C_r^2 - C_{trans}^2 \quad (III.3)$$

La eficiencia de la estructura para la disipación de la energía incidente viene determinada por la Ec. III.3. Si no existe transmisión a través del terreno bajo la estructura ni a su través, ni en forma de rebase, entonces las características disipativas pueden considerarse antirreflejantes, puesto que la energía que no sea disipada se reflejará. El diseño de las estructuras marítimas deberá ajustarse a los requisitos antirreflejantes necesarios para asegurar la seguridad y operatividad.

III.1.1. Reflexión

La reflexión tiene lugar cuando se produce un cambio brusco en las características geométricas del medio en el que se propaga la oscilación, provocando variación en

¹¹⁰ Puede expresarse en términos de los flujos de energía que atraviesan un volumen de control en el que se encuentra la estructura marítima, asumiendo que los procesos de transformación de las ondas se describen por la teoría lineal, sin corrientes, y sin cambio de profundidad, con lo que los números de onda y celeridades de fase y grupo son idénticas (ROM 1.0-09, 2009). En situaciones resonantes puede producirse transferencia de energía entre frecuencias por procesos no lineales que no serían correctamente representadas.

¹¹¹ La altura de ola incidente es el factor de escala de las transformaciones.

el número de onda y en la dirección (o sentido) de propagación. Las características geométricas pueden ser: cambio de profundidad brusca o por pendiente en un talud.

También las características que definen el flujo hidráulico: porosidad, permeabilidad y fricción equivalente de la sección y del contorno, y las características del oleaje incidente, principalmente el periodo, condicionan el fenómeno de la reflexión.

Partiendo de la teoría línea, la reflexión puede definirse mediante el coeficiente adimensional de reflexión complejo:

$$C_R = C_{R,real} + i \cdot C_{R,imag} \tag{III.4}$$

En el que el módulo del coeficiente de reflexión complejo, C_R , es el generalmente denominado coeficiente de reflexión, C_r , que cuantifica globalmente todos los procesos de reflexión, siendo representado por las expresiones:

$$C_r = \sqrt{C_{R,real}^2 + C_{R,imag}^2} = \sqrt{\frac{E_{ref}}{E_{inc}}} = \frac{H_{ref}}{H_{inc}} \tag{III.5}$$

La fase indica la distancia adimensional respecto del punto imaginario en el que se produciría la reflexión con módulo igual al coeficiente de reflexión, cuyo efecto sería equivalente al que producen todos los procesos de reflexión con sus distintos focos de reflexión:

$$\varphi_r = arctg\left(\frac{C_{R,imag}}{C_{R,real}}\right) \tag{III.6}$$

Permite, pues definir la posición que debería ocupar un paramento vertical, completamente reflejante, para producir la misma reflexión.

Los valores de los coeficientes de reflexión típicos para oleaje incidente sobre estructuras y playas se indican en la *Tabla III.1* (Goda, 2010). Para onda larga, la reflexión es prácticamente completa para las estructuras convencionales.

Tabla III.1. Valores de los coeficientes de reflexión para oleaje (Goda, 2010)

Estructura	C_r
Paramento vertical con coronación sobre el nivel del agua	0.7-1.0
Paramento vertical con coronación sumergida	0.5-0.7
Talud de escollera (pendiente 1/2 a 1/3)	0.3-0.6
Talud con bloques de hormigón disipativos	0.3-0.5
Estructura vertical antirreflejante	0.3-0.5
Playa natural	0.05-0.2

III.1.2. Disipación

Los mecanismos principales de disipación de energía oscilatoria en estructuras marítimas son la rotura, la fricción y la interferencia destructiva de ondas, entre otros.

III.1.2.1. Disipación por rotura

La rotura puede clasificarse a partir de la relación entre el talud y el peralte de la onda definido por el número de Iribarren (Iribarren y Nogales, 1949 y Battjes, 1974):

$$I_r = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H/L_0}} \quad (III.7)$$

donde α es el ángulo que forma el talud con la horizontal, H es la altura de ola y L_0 es la longitud de onda en aguas profundas. Iribarren y Nogales (1950) obtuvieron el talud límite entre la rotura y la reflexión¹¹², siendo equivalente a $I_r \approx 2.3$ (Battjes, 1974)¹¹³.

Los tipos de rotura en función del número de Iribarren se muestran en la *Tabla III.2* (Battjes, 1974; Sunamura y Okazuki, 1991). La mayor disipación de energía incidente por rotura alcanza hasta el 90% para los mecanismos de descrestamiento¹¹⁴ y voluta, llegando hasta el 60% para colapso y oscilación (ROM 1.0-09, 2009).

Tabla III.2. Tipos de rotura en función del número de Iribarren (Sunamura y Okazuki, 1991)

rango I_r	Tipo de rotura
0 - 0.5	descrestamiento
0.5 - 2.5 (3.3*)	voluta
(3.3*) 2.5 - 3.7	colapso
3.7 - ∞	oscilación
* valores en Battjes, 1974)	

III.1.2.1. Disipación por fricción

La disipación de energía por fricción es función del régimen hidráulico. El régimen hidráulico, laminar o turbulento, generalmente es definido en función del número de Reynolds.

$$Re = \frac{v^* \cdot L^*}{\nu} \quad (III.7)$$

con v^* la velocidad característica del fluido, L^* La longitud característica y ν la viscosidad cinemática del fluido¹¹⁵.

¹¹²Obtenido a partir de la teoría de onda trocoidal en aguas someras para onda uniforme progresiva. En esas condiciones, el límite de estabilidad se produce cuando el valor de la amplitud de la onda es igual a la profundidad.

¹¹³Battjes et al (2004) indican que el criterio que se emplea para distinguir entre rotura y no rotura en el caso de oleaje puede ser aplicado a oscilaciones de baja frecuencia en las proximidades de la costa, suponiendo que las pérdidas de energía son asociadas a la rotura de las ondas largas,

¹¹⁴La estimación de la disipación de la altura de ola producida por descrestamiento puede obtenerse asimilando el proceso al que tiene lugar en un resalto hidráulico (ROM 1.0-09, 2009).

¹¹⁵ Valor de la viscosidad cinemática del agua $\nu \sim 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$.

El flujo laminar en masas de agua, dominado por los efectos viscosos se produce, generalmente, con números de Reynolds inferiores a 2000 en conductos y $5 \cdot 10^5$ en flujo externo¹¹⁶. El régimen turbulento, en el que prevalecen los efectos de inercia, es asociado a números de Reynolds superiores a 4000 en conductos y 10^6 en flujo externo¹¹⁷. La zona intermedia es la zona de transición, en la que el flujo puede comportarse como laminar o como turbulento. En régimen laminar, la disipación es proporcional al cuadrado de la velocidad de las partículas. En régimen turbulento, la disipación es proporcional a la velocidad al cubo y al número de Reynolds¹¹⁸. En general, el número de Reynolds y la porosidad y tamaño de los elementos condicionan la disipación por fricción.

La disipación por fricción puede incrementarse:

- en los contornos: aumentando la rugosidad relativa¹¹⁹ disponiendo elementos de altura variada irregularmente repartidos.
- en el interior del elemento: con paredes porosas o ranuradas que aumenten el número de contracciones, expansiones y separaciones de lámina en la propagación del movimiento oscilatorio.

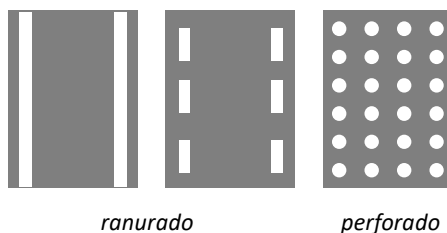


Figura III.1. Tipología de pared porosa.

III.1.2.2. Otros mecanismos de disipación

Otros mecanismos de disipación en estructuras marítimas se basan en la producción de interferencias entre ondas¹²⁰ con fines en la antirreflexión en si misma o para el aprovechamiento energético de las ondas, o en la formación de remolinos o resaltos.

La interferencia entre ondas se basa en la hipótesis de superposición lineal de ondas, de manera que dos ondas monocromáticas que se propagan juntas en la misma dirección, con la misma longitud de onda y la misma amplitud, pueden anularse si una está desfasada de la otra un ángulo $\varphi = \pi$. En el caso en que se propaguen en

¹¹⁶La referencia para flujo externo es la que se define sobre una placa horizontal lisa.

¹¹⁷Si bien, como se verá en el *Capítulo V*. Los efectos de la viscosidad cinemática en la propagación del oleaje en aguas someras ($d/L < 1/20$) está asociado a $Re > 10^4$ (Schüttrumpf, 2001).

¹¹⁸Parte de la disipación es debida a la separación del flujo alrededor de los obstáculos, convergencia y divergencia, formación de remolinos y estelas, así como transmisión de cantidad de movimiento asociada a turbulencia.

¹¹⁹El valor de la rugosidad relativa es el cociente entre la rugosidad de Nikuradse (altura efectiva de las irregularidades que forman los elemento de la rugosidad), k_s y la profundidad, d .

¹²⁰La idea que subyace en estas técnicas es que "destruir ondas implica crear ondas" (Falnes, 2004).

sentidos opuestos, se forma una onda estacionaria con amplitudes nulas en los nodos y máximas en los antinodos (ver apartado II.2.3). Este mecanismo de disipación se analizará posteriormente al describir las estructuras tipo Jarlan.

La geometría de la forma en planta de las estructuras marítimas antirreflejantes, como en el caso del paramento frontal curvado del dique Duca degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Oumeraci, 1993) también puede provocar disipación de energía por interferencia de ondas al cambiar la posición del punto de reflexión, modificándose la fase y la dirección de la onda reflejada en cada punto.

Asimismo, la geometría de las estructuras en planta puede provocar la disipación de energía en la formación de remolinos o por efectos inerciales en la transformación del momento angular en movimientos de eje vertical. Diseños como los formados por estructuras como la pieza ARPA (González-Escrivá et al, 2007 y Garrido et al, 2009) o el OWLS (Ohshima et al, 2007 y Nakahima et al, 2011), provocan la creación de movimientos de eje vertical con sentidos de giro cambiantes en cada oscilación (ver Fig. III.2). Asimismo, los diseños con variaciones de profundidad en escalón como el mostrado en la parte superior de la Fig. III.1 producen resaltos con disipación de energía principalmente en la fase vaciante.

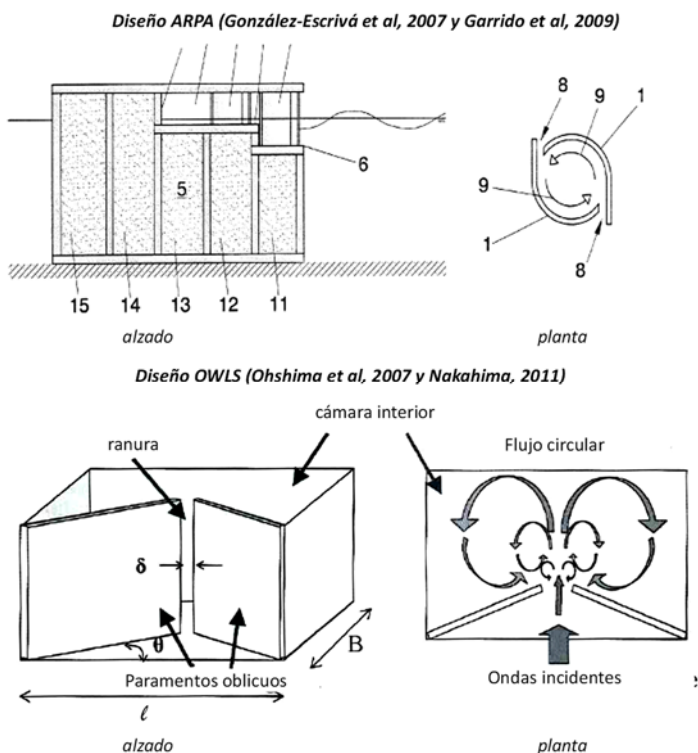


Figura III.2. Diseños geométricos que provocan disipación por flujo giratorio de la masa de agua.

Por último, la incorporación de flotadores en mecanismos para el aprovechamiento energético¹²¹ se basa en la generación de ondas por un cuerpo flotante en oscilación, de forma que produzca interferencia destructiva con las ondas incidentes y las radiadas por el flotador (Seymour, 1992).

III.2. Estructuras antirreflejantes tipo Jarlan para ondas de corto periodo

La rotura es uno de los mecanismos que produce la mayor disipación de energía del oleaje, produciéndose de forma natural en las costas como consecuencia principalmente de la reducción de profundidad. La variación de profundidad en las estructuras artificiales en talud emergida es, generalmente, más rápida que en las costas, provocando la rotura del oleaje sobre las mismas¹²², mientras que las ondas de largo periodo se reflejan prácticamente en su totalidad, en las mismas.

Por otra parte, en el interior de los puertos, las estructuras en talud son menos adecuadas que las estructuras verticales para la configuración de la línea de atraque, por lo que habitualmente¹²³, en los muelles, el paramento frontal es un plano vertical.

Las estructuras verticales, además de permitir el atraque y amarre de barcos, presentan más ventajas como un mejor aprovechamiento del espacio marítimo, ahorro en materiales con la consiguiente mejora económica y ambiental, y, en el caso de estructuras marítimas de cajones, la optimización en los plazos de ejecución con el empleo de cajoneros.

Sin embargo, el gran inconveniente de las estructuras verticales es 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. La reflexión en las estructuras verticales puede dar cabida a un incremento de la agitación o a oscilaciones resonantes en las dársenas, con el consiguiente el aumento de altura de onda, corrientes, la erosión local, rebase, y los esfuerzos sobre la estructura. Los diferentes sistemas antirreflejantes persiguen la reducción la energía reflejada en la estructura y devuelta al mar, provocando la disipación de esta mediante diversos mecanismos.

Las estructuras marítimas verticales más habituales para la atenuación de ondas combinan uno o varios de los mecanismos de disipación descritos en el apartado anterior, pudiendo caracterizarse mediante cinco parámetros (Oumeraci, 2010):

- B_{est} = ancho de la estructura

¹²¹ Habitualmente referidos por las siglas "WEC", correspondientes a los términos "Wave Energy Converter".

¹²² Iribarren y Nogales (1950) obtuvieron el talud límite entre la rotura y la reflexión, siendo equivalente a $l/\lambda \approx 2.3$ (Battjes, 1974).

¹²³ Excepto cuando se trata de un muelle sobre pilotes.

- d_{est} = altura de la estructura
- ε = porosidad
- d = profundidad
- d_1 = altura de la columna de agua sobre la estructura
- d_2 = altura de la columna de agua bajo la estructura

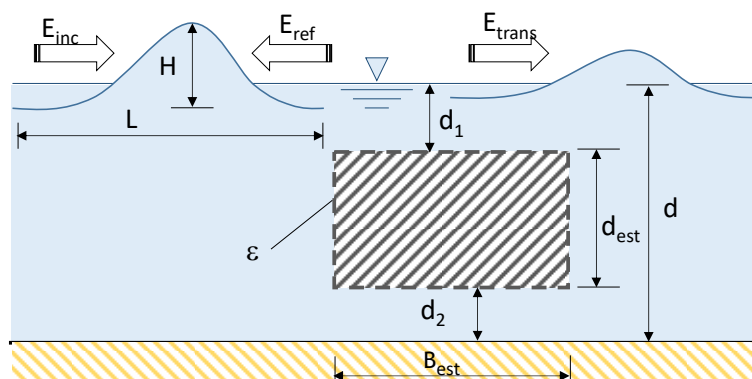


Figura III.3. Parametrización básica de una estructura marítima para atenuación de ondas (adaptado de Oumeraci, 2010).

La combinación de dichos parámetros, conduce a la propuesta de clasificación de las estructuras típicas en la atenuación de ondas (Oumeraci, 2010). La Fig. III.4 reproduce dicha clasificación, abarcando desde pantallas de pared delgada hasta estructuras masivas, con paramentos impermeables o porosos, dispuestas emergidas, sumergidas o flotantes.

		$d_1 > d$	$d_1 > d$	$d_1 < d$	$d_1 < d$	$d_1 = 0$
		$d_1 = 0$ $d_2 = 0$	$d_1 > 0$ $d_2 = 0$	$d_1 = 0$ $d_2 > 0$	$d_1 > 0$ $d_2 > 0$	$d_1 + d_2 = d$
$B_{est} = 0$ pantalla	$\varepsilon = 0$ impermeable	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5 sin estructura
	$\varepsilon = 0$ permeable	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5 sin estructura
$B_{est} > 0$ estructura	$\varepsilon > 0$ impermeable	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
	$\varepsilon > 0$ permeable	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5

Figura III.4. Clasificación de las estructuras marítimas más habituales para la atenuación de ondas (Oumeraci, 2010).

La respuesta de las estructuras reflejadas para las estructuras clasificadas, se representa en la Fig. III.5, con carácter cualitativo, en términos de la no transmisibilidad para oleaje, definida como:

$$C_{no\ trans} = 1 - C_{trans}^2 = C_r^2 + C_{dis}^2 \quad (III.8)$$

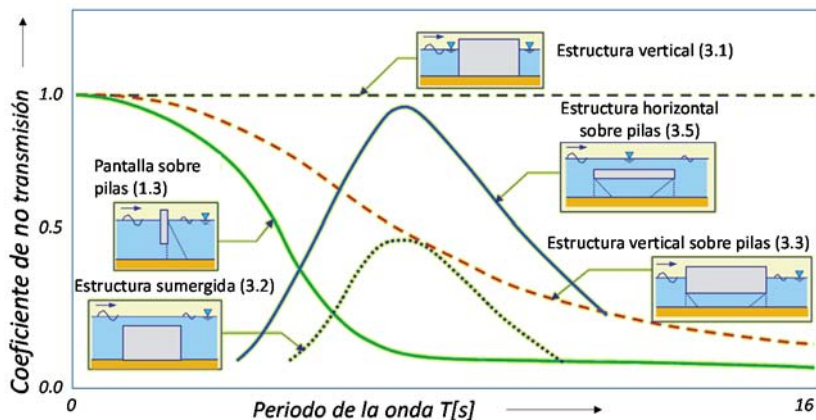


Figura III.5. Respuesta cualitativa de algunas de las tipologías de estructuras para la no transmisibilidad (adaptada de Oumeraci, 2010).

Se presentarán, únicamente, las estructuras que no permiten la transmisión de energía a través de la propia estructura. Éstas son las estructuras verticales emergidas, con paramento hasta el fondo marino o hasta la cimentación de la misma estructura. La mejor respuesta disipativa, para aquellas estructuras con transmisibilidad nula, constituirá la característica antirreflejante a obtener en el diseño de estructuras para la atenuación de ondas.

La necesidad de mantener la alineación para el atraque y amarre en la mayor parte de los paramentos interiores de los puertos restringe las posibilidades de incorporar medidas antirreflejantes con paramentos exteriores curvos, u otras geometrías en planta distintas de la línea recta¹²⁴. La solución de muelles sobre pilotes o pilas, con un talud de escollera interior, suele ser una solución habitual cuando el terreno es incompatible con las estructuras de gravedad o cuando las cargas sobre el muelle no son muy elevadas.

Sin embargo, las estructuras antirreflejantes más habituales en los puertos comerciales son las que incorporan un paramento frontal poroso, formado por orificios o ranuras, que permita parcialmente el paso de la energía del oleaje, con un paramento trasero vertical reflejante, pudiendo incorporar otros paramentos porosos en su interior, verticales o no, definiendo así unos espacios o cámaras donde puede provocarse la disipación del oleaje. Los mecanismos de disipación principales

¹²⁴ Que por otra parte serían muy costosos de ejecución.

disponibles en estas estructuras son: la disipación por fricción y la disipación por interferencia destructiva, producida por el desfase entre la onda que es devuelta al exterior desde el interior de las cámaras y el oleaje incidente.

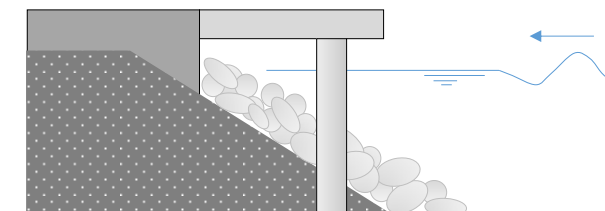


Figura III.6. Muelle sobre pilas con talud de escollera interior.

Se atribuye a Jarlan (1961), el primer diseño de estructura marítima vertical con una única cámara entre el paramento frontal perforado y la pared trasera impermeable¹²⁵, por ello, las estructuras basadas en dicho diseño se denominan estructuras antirreflejantes tipo Jarlan, o ARJ. La Fig. III.7 reproduce: a) el diseño conceptual propuesto por Jarlan y b) la sección transversal del dique de Corneau Bay (Canadá), primera estructura ARJ construida en 1966. En 1969 y 1970 se incorporaron estructuras ARJ a los puertos japoneses de Kobe y Takamatsu, respectivamente.

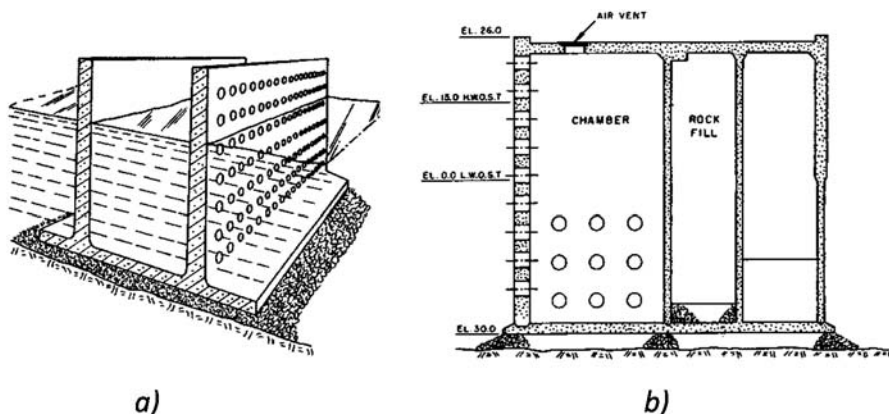


Figura III.7. Estructura marítima antirreflejante propuesta por Jarlan (1961).

La estructura original de Jarlan cuenta con una única cámara de disipación en la que la profundidad del agua en la misma es aproximadamente la misma que en el exterior de la estructura. A partir del diseño de Jarlan las modificaciones típicas suelen ser:

¹²⁵Wiegel (1960) hace referencia previamente a las pantallas ranuradas y a los diques de pilas, los cuales han sido empleados desde la antigüedad.

- la profundidad de las cámaras, desde las completamente perforadas hasta las parcialmente perforadas, pudiendo variar respecto del exterior y entre cámaras.
- el número de cámaras definidas por paramentos verticales paralelos al frontal, creando cámaras únicas o múltiples.
- la disposición de una cubierta de cierre superior a las cámaras con posibilidad de orificios, siendo abiertas o cerradas superiormente.
- la incorporación de un relleno de escollera disipativo en el interior de las cámaras pudiendo formar un talud interior.
- la compartimentación de las cámaras mediante pantallas perforadas horizontales.

La propuesta de clasificación de las estructuras ARJ más habituales se representa en la Fig. III.8 (Huang et al., 2011) pudiendo combinarse entre sí.

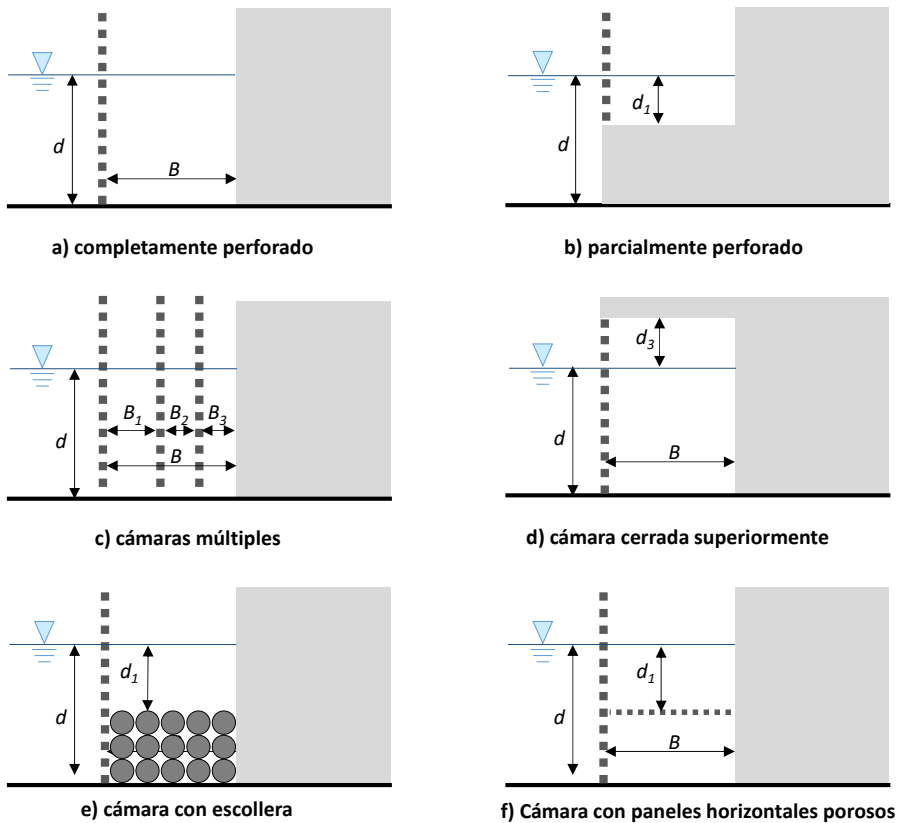


Figura III.8. Variaciones a partir de la tipología Jarlan para estructuras verticales (adaptada de Huang, 2011).

Además, los diseños pueden incorporar otras variaciones particulares, como:

- la inclusión de pantallas perforadas verticales perpendicularmente al paramento frontal para compartimentación las cámaras en la dirección principal de la estructura para atenuar oleaje oblicuo.
- la configuración geométrica en planta que produzca giro del flujo.
- la incorporación de elementos disipativos que generen rugosidad adicional en el interior de las cámaras.
- la ubicación en el interior de las cámaras de mecanismos para el aprovechamiento energético de las ondas.

A continuación se revisarán las características principales de las estructuras ARJ para la absorción de energía del oleaje desde el punto de vista de los mecanismos de disipación y de potencialidad disipativa con la perspectiva de su posible aplicación para la atenuación de ondas largas. Una revisión desde una perspectiva cronológica del estado del arte puede consultarse en Colucci y Damiani (2010) o Garrido (2011).

III.2.1. Estructuras ARJ completamente perforadas

Las estructuras ARJ completamente perforadas son aquellas en las que el paramento frontal está perforado en toda su extensión, definiéndose una cámara entre éste y el paramento trasero impermeable, en la que la profundidad y la longitud de onda en el interior de la cámara son las mismas que en el exterior.

Las variables principales que definen la respuesta disipativa de estas estructuras son:

- la definición geométrica de la porosidad del paramento frontal, ε , a partir del ancho de ranura o diámetro del orificio, a , la distancia entre aberturas, A , y el espesor de la pared perforada, δ .
- el ancho relativo de la cámara, o distancia entre el paramento frontal y el trasero en relación a la longitud de onda incidente:

$$B_{rel} = \frac{B}{L} \quad (III.9)$$

siendo B el ancho de la cámara y L la longitud de onda en la cámara.

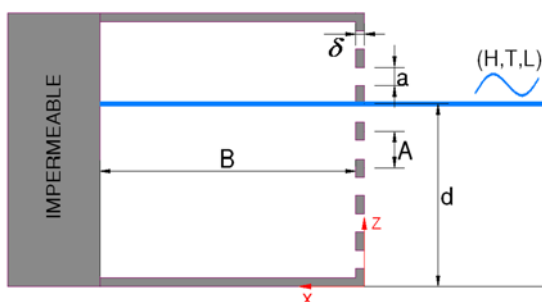


Figura III.9. Estructura ARJ completamente perforada de una cámara

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.

La respuesta cualitativa de las estructuras ARJ completamente perforadas se representa en la Fig. III. 10, en la que, al ser la transmisión nula, la energía incidente ha de estar en equilibrio con la energía reflejada y la disipada. Se aprecia como los mecanismos de fricción e interferencia destructiva de ondas por desfase están afectados por la relación de la anchura relativa de cámara.

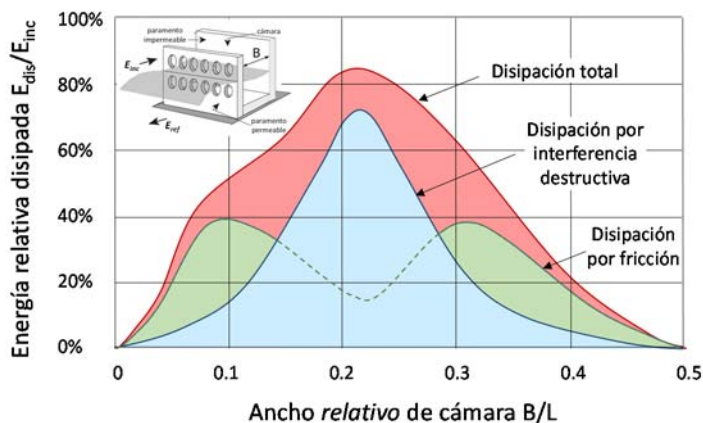


Figura III.10. Disipación para la tipología Jarlan (adaptada de Oumeraci, 2010).

Partiendo de la teoría lineal del potencial de velocidades¹²⁶, puede obtenerse una expresión analítica para el coeficiente de reflexión (Sahoo et al, 2000):

$$C_R = \left| \frac{1-G \cdot [1-i \cot g(k \cdot B)]}{1+G \cdot [1+i \cot g(k \cdot B)]} \right| \quad (III.10)$$

en función del parámetro del efecto de la porosidad de la pared perforada o ranurada, con las condiciones de contorno de pared delgada porosa (Sollit y Cross, 1972; Yu, 1995), G ¹²⁷¹²⁸:

¹²⁶El movimiento de las ondas puede asumirse como irrotacional y por lo tanto definirse una función potencial de velocidades excepto en regiones muy estrechas junto a los huecos u orificios de la pared; donde el flujo es turbulento existiendo una caída de presión a través de la pared como consecuencia de la disipación de energía.

¹²⁷Considera el efecto de disipación que tiene lugar cuando las ondas atraviesan una pared delgada porosa. La parte real de G se refiere a la disipación de energía debida a la resistencia al paso de las ondas a través de la pared porosa. La parte imaginaria de G está relacionada con el desfase que se produce por el efecto inercial de la pared.

¹²⁸Mei et al, 1974, propone un método para la estimación de la disipación de energía de la onda al atraviesa la pared perforada a partir de un coeficiente cuadrático de pérdida de energía. Suh et al, 2006, indica que los resultados estimados con dicho método para ondas largas son erróneos.

$$G = \frac{\varepsilon}{k \cdot \delta (f - i \cdot s)} \quad (\text{III.11})$$

donde $i = \sqrt{-1}$, la unidad imaginaria, k el número de onda, ε es la porosidad de la pared, δ es el espesor de la pared, f es el coeficiente lineal de resistencia porosa:

$$f = -3338.7 \cdot \left(\frac{\delta}{d}\right)^2 + 82.769 \cdot \left(\frac{\delta}{d}\right) + 8.711 \quad \text{si } \frac{\delta}{d} < 0.05 \quad (\text{Li et al, 2006})$$

$$f = 2 \quad \text{si } \frac{\delta}{d} > 0.1 \quad (\text{Yu, 1995}) \quad (\text{III.12})$$

El cual también puede ser definido en términos del número de Keulegan-Carpenter, KC (Liu y Li, 2016)¹²⁹:

$$f = 0.989 (KC)^{0.746} \quad \text{para } Re \approx 150 - 2100$$

$$f = 0.270 (KC)^{0.957} \quad \text{para } Re \approx (0.6 - 1.8) \cdot 10^5 \quad (\text{III.13})$$

y s es el coeficiente de inercia que engloba los efectos inerciales de la pared:

$$s = 1 + C_m \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \quad (\text{III.14})$$

relacionado con el coeficiente de masa añadida, C_m , a obtener experimentalmente¹³⁰.

Despreciando los efectos inerciales de la pared, los valores de ancho relativo de cámara que minimizan la expresión del coeficiente de reflexión son:

$$\frac{B}{L} = 0.25 + 0.5 \cdot n \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{III.15})$$

Aunque como consecuencia de la limitación en el ancho de las estructuras marítimas, sólo se desarrollarán los modos fundamentales ($n=0$).

El mínimo del coeficiente de reflexión tiene lugar cuando la onda reflejada en la pared impermeable trasera está en oposición de fase con la onda incidente en la pared frontal (Fugaza y Natale, 1992)¹³¹, y la diferencia en los niveles de agua a ambos lados de la pared frontal porosa es máxima.

Los datos experimentales de las estructuras ARJ completamente perforadas de una cámara indican que el modo fundamental resonante se produce típicamente en el rango $0.2 < B/L < 0.25$ (Garrido, 2011), o incluso para $B/L < 0.2$ (Kakuno et al, 1992) para paredes gruesas en relación a la profundidad (lo cual puede ser atribuido a los efectos inerciales y a la no linealidad de las ondas (Huang et al, 2011).

¹²⁹El número de Keulegan-Carpenter $KC = H \cdot L / 2 \cdot d \cdot \delta$ incluye en su definición los parámetros altura de la onda y el periodo incorporándose de esa forma a la definición del coeficiente de resistencia porosa f . Nótese la dependencia del número de Reynolds cuyo efecto en los modelos a escala reducida se discutirá en el *Capítulo V*.

¹³⁰Generalmente, el efecto inercial de una pared delgada porosa no es relevante, por lo que para la mayoría de los casos prácticos, algunos autores proponen utilizar $C_m = 0$ (Yu, 1995; Li et al, 2006).

¹³¹Considerando despreciables los efectos inerciales, y por lo tanto suponiendo que las ondas no cambian de fase al atravesar la pared porosa.

Otras técnicas para la estimación de la respuesta disipativa de los cajones tipo Jarlan completamente perforados se basan en la teoría acústica de la impedancia (Zhu y Zhu, 2010) o en técnicas de inteligencia artificial y evolutivas para la obtención de un modelo semi-empírico Garrido y Medina (2012) y Garrido (2012)¹³².

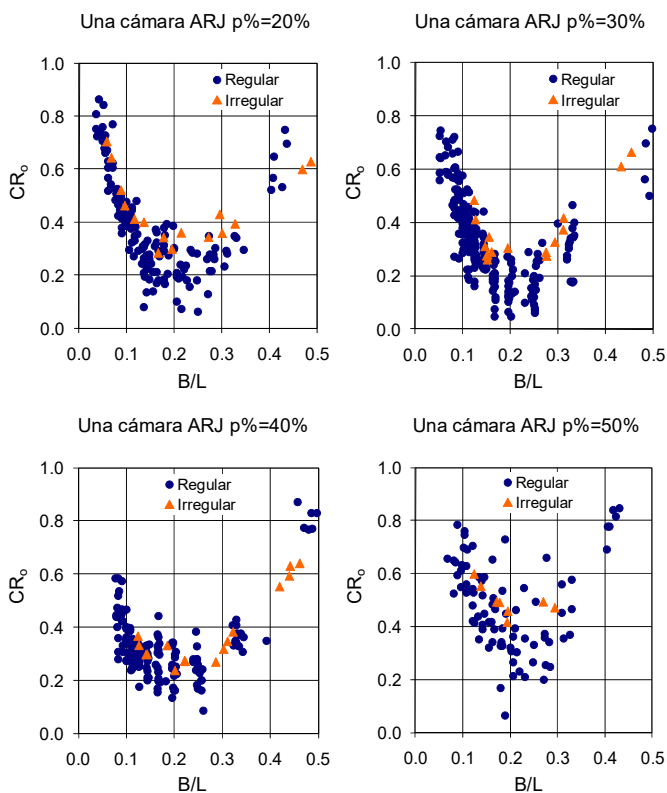


Figura III.11. C_r experimental vs. B/L para diferentes porosidades. ARJ con una cámara completamente perforada (Garrido, 2012).

III.2.2. Estructuras ARJ parcialmente perforadas

Las estructuras ARJ completamente perforadas son menos estables que las tradicionales reflejantes debido al aligeramiento que impone que la profundidad en la cámara sea la misma que en el exterior. Además, en terrenos de baja capacidad portante, las cargas no uniformes pueden proporcionar asientos diferentes.

¹³²Utilizan el modelo de Fugazza y Natale (1992) con un coeficiente de pérdida cuadrática estimado experimentalmente. El resultado obtenido alimenta un sistema de redes neuronales que son podadas con estrategias evolutivas proporcionando expresiones explícitas compactas del coeficiente de reflexión para una y dos cámaras, con oleaje regular e irregular.

Las estructuras ARJ parcialmente perforadas, en las que la profundidad de la cámara interior es menor que la profundidad exterior a la estructura, permiten el relleno de la parte inferior de la cámara para proporcionar mayor estabilidad a la estructura marítima. Por otra parte, la reducción de profundidad en el interior de la cámara, provoca una discontinuidad que afectará a la propagación de la onda en su interior, al reducir la longitud de onda. Asimismo, la menor porosidad del paramento frontal provocará una mayor reflexión, incrementando sus posibles efectos asociados. Además, los diseños con variaciones de profundidad en escalón como el mostrado en la parte superior de la Fig. III.1 producen resaltos con disipación de energía principalmente en la fase vaciante.

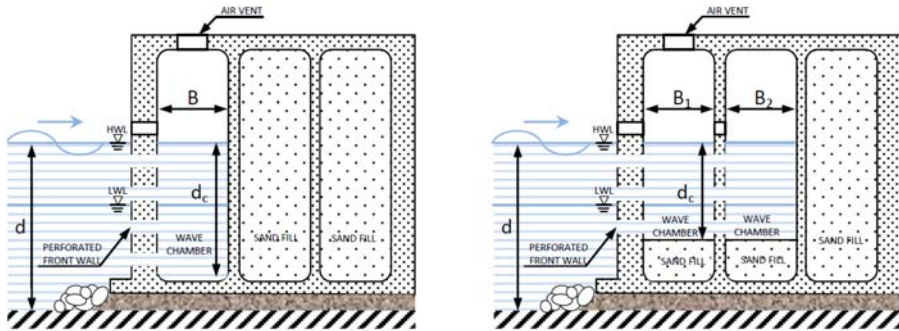


Figura III.12. Estructuras ARJ: de una cámara completamente perforada (izquierda) y de dos cámaras parcialmente perforada con $d_c < d$ (derecha).

La Fig. III.13 (Huang et al, 2011) muestra la respuesta típica de estructuras ARJ completa y parcialmente perforada en función del ancho relativo, que en el caso de la cámara parcialmente perforada depende de la longitud de onda en el interior de la cámara, L_1 . Para la estructura ARJ parcialmente perforada se representan los resultados correspondientes a distintos valores de la relación de profundidades cámara/externa, d_1/d .

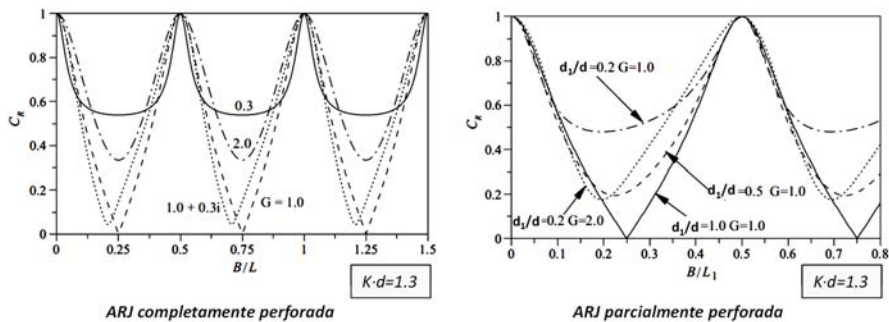


Figura III.13. Respuesta comparada de estructuras ARJ completa y parcialmente perforada (Huang et al, 2011).

La reducción de la profundidad en el interior de la cámara respecto de la profundidad exterior, d_1/d , tiene por efecto la reducción del valor de B/L_1 en que se alcanza el mínimo coeficiente de reflexión¹³³. Al reducir la relación d_1/d , el mínimo coeficiente de reflexión se obtiene con mayor porosidad de la pared frontal¹³⁴.

La optimización del coeficiente de reflexión a su valor mínimo puede obtenerse combinando adecuadamente los parámetros de diseño d_1/d y ε . El rango de valores B/L_1 en los que la eficiencia atenuadora de la estructura es máximo se reduce con d_1/d , lo que implica que un diseño con relaciones d_1/d muy bajas sólo será eficiente para oleajes muy concretos.

El coeficiente de reflexión mínimo, obtenido experimentalmente es $C_r = 0.15$ para $d_1/d = 0.5$ (Li et al, 2002; Liu et al, 2007). El óptimo de diseño en términos del ancho relativo de cámara, B/L_1 , obtenido experimentalmente para varios valores de d_1/d se muestra en la *Tabla III.3*.

Tabla III.3. Valores de B/L_1 y d_1/d para la reflexión mínima

B/L_1	d_1/d	referencia: autor (año)
0.15-0.20	0.33-0.85	Tanimoto y Yashimoto (1982)
0.15	0.50	Li et al (2002); Liu et al (2007)
0.15	0.34	Lee et al (2014)
0.20	0.65	Hsu et al (2006)

Una extensión de las estructuras ARJ es la constituida por piezas que puedan ser integrados en una estructura vertical para amarre y atraque como el caso del elemento modular GMAR (González-Escrivá, 2007). Los resultados del ajuste realizado sobre los datos experimentales mediante redes neuronales podadas con estrategias evolutivas (Medina et al, 2002) se muestran en la *Fig. III.14* en la que se representa la energía reflejada en función del ancho relativo de cámara corregido, $(B/L)^*$. La gráfica proporcional la anchura corregida $(B/L_c)^*$, a partir de los adimensionales d/d_1 , B/L_c y $k \cdot d^{135}$, obteniéndose a continuación la estima neuronal de la energía reflejada corregida $(ER_{nn}\%)^*$, para estimar la energía reflejada $ER\%$.

¹³³Huang et al (2011) relaciona la reducción de valor B/L_1 óptimo para la mínima reflexión con el incremento en los modos evanescentes provocados por el abrupto cambio de profundidad y que pueden contribuir a una mayor resonancia en la cámara.

¹³⁴Relacionada con el parámetro G .

¹³⁵Verificando que se encuentran en los rangos de validez de la fórmula

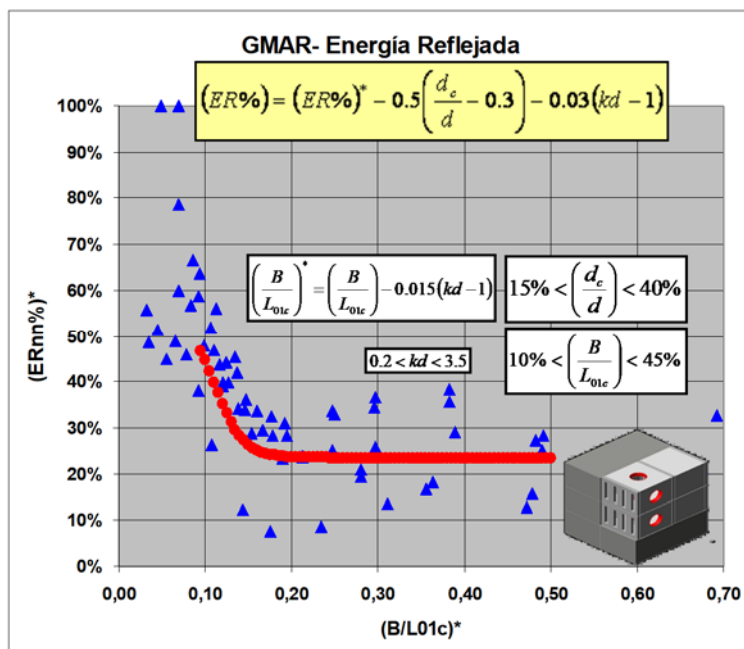


Figura III.14. Relación entre la energía reflejada y el ancho relativo de cámara para el diseño ARJ con perforación parcial formado por elementos modulares GMAR (González-Escrivá et al, 2007).

III.2.3. Estructuras ARJ con múltiples cámaras

La creación de estructuras ARJ de múltiples cámaras mediante la incorporación de paredes perforadas adicionales entre la pared frontal y la trasera, dispuestas paralelamente a éstas, incrementa la disipación producida por el paso de las ondas a través de las paredes, al tiempo que modifica las condiciones de resonancia interiores si se varían los anchos de las cámaras. Los paneles pueden estar completa o parcialmente perforados y las cámaras ser de igual o distinta profundidad. Las estructuras del dique de Porto Torres (Italia) y la terminal de la Dalian Chemical (China) son ejemplos de estructuras ARJ con tres y cinco cámaras, respectivamente.

Combinando adecuadamente las características geométricas de los ARJ de múltiples cámaras es posible reducir el coeficiente de reflexión respecto de los diseños ARJ monocámara¹³⁶ (Kondo, 1979; Fugazza y Natale, 1992; Garrido y Medina, 2006; Huang, 2011; Lee, 2014), además de extender la eficiencia atenuadora a un mayor rango de oleajes.

¹³⁶Poca variación para ondas largas si no se incrementa el ancho total de la zona de disipación (Huang et al, 2011).

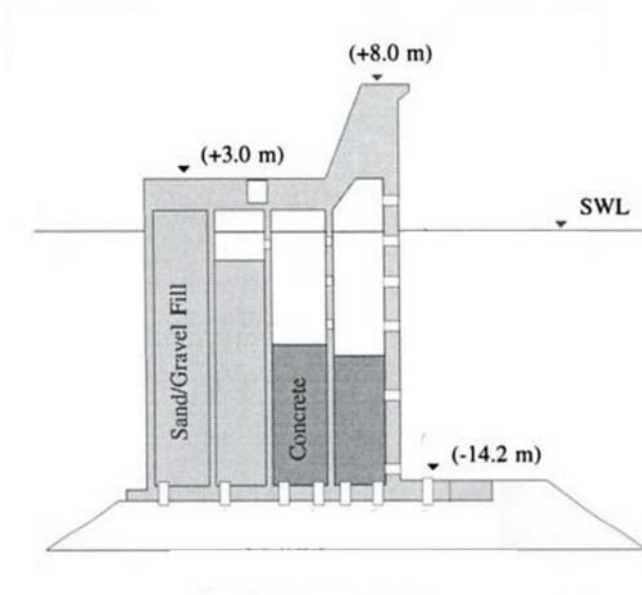


Figura III.15. Sección de la estructura ARJ de cámaras múltiples para el dique de Porto Torres, Italia (de Oumeraci et al, 2001)

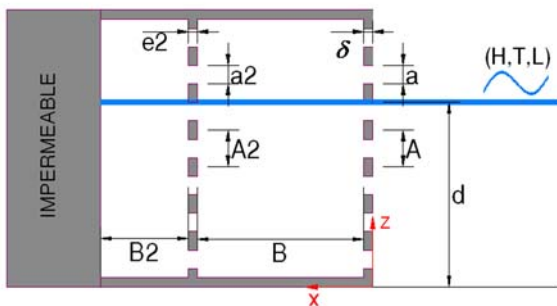


Figura III.16. Esquema estructura ARJ completamente perforada de dos cámaras

La Fig. III.17 muestra la respuesta comparada típica de estructuras ARJ multicámara completamente perforadas, formadas a partir de una estructuras ARJ monocámara, a las que se le incorpora un panel perforado en entre el paramento frontal y el posterior de forma que $B_1 = B_2 = B/2$, con B_1 y B_2 los anchos de las cámaras en las estructuras ARJ multicámara y B el ancho en las estructuras ARJ monocámara¹³⁷.

¹³⁷Kondo (1979) realizó experimentos con separaciones entre el paramento frontal y la pared intermedia del 25, 50 y 75% del ancho total obteniendo el menor C_r para la ubicación de la pared central intermedia (50%).

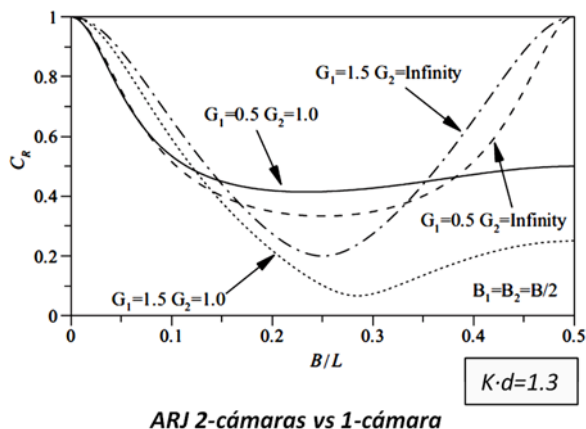


Figura III.17. Comparación entre las respuestas de estructuras ARJ con dos cámaras y con una cámara ($G_2 = \infty$, sin pared intermedia) con igual ancho de la zona disipativa. (Li et al, 2003).

Para porosidades geométricas pequeñas, la doble cámara sólo mejora las ondas más cortas, empeorando incluso para los oleajes de periodo intermedio; con porosidades mayores se reduce C_r para un mayor rango de oleajes excepto los más largos. La *Tabla III.4* resume los resultados experimentales analizados.

Tabla III.4. Comparación de las estructuras ARJ con 1 y 2 cámaras. Sentido de la variación del coeficiente de reflexión con 1 o 2 cámaras, respectivamente.

Tipología ARJ $B_1 = B_2 = B/2$	G-factor		rango B/L			
	G_1	G_2	$B/L < 0.1$	$0.1 < B/L < 0.2$	$0.2 < B/L < 0.4$	$B/L > 0.4$
1 cámara	0.5	∞	~	↓ C_r	↓ C_r	↑ C_r
	1.5	∞	~	~	↑ C_r	↑ C_r
2 cámaras	0.5	1.0	~	↑ C_r	↑ C_r	↓ C_r
	1.5	1.0	~	~	↓ C_r	↓ C_r

* $k \cdot d = 1.3$ ARJ completamente perforada

Li et al (2003) experiments

Los resultados experimentales en las *Figs. III. 18* (Oumeraci, 2009) y *III. 19*¹³⁸ (Garrido, 2012) muestran el mismo comportamiento descrito, en esta última más claramente para oleaje irregular que para oleaje regular.

¹³⁸Los resultados mostrados en la *Fig. III. 17* son un resultado parcial de los 1800 ensayos de oleaje regular y 160 ensayos de oleaje irregular realizados en LPC-UPV en el periodo 2002-2011 para el estudio de las estructuras marítimas antirreflejantes ARJ (Garrido, 2012).

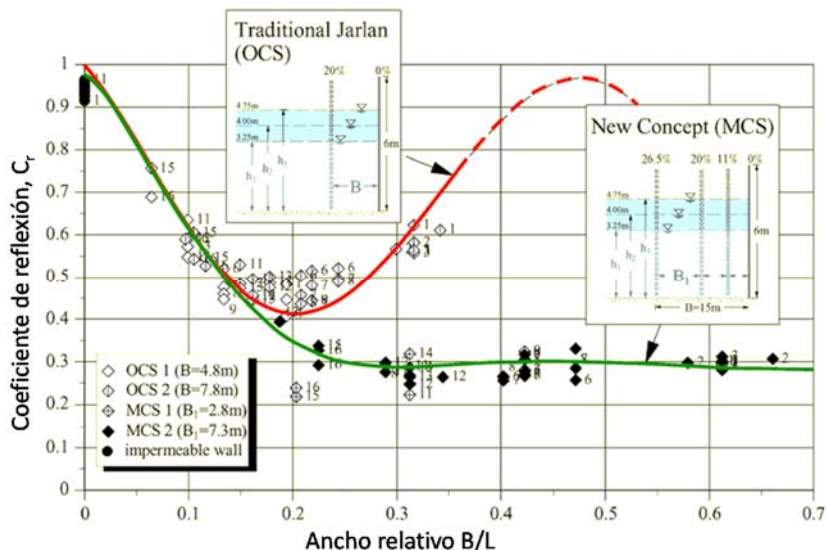


Figura III.18. C_r en función del ancho relativo para diferentes porosidades. Estructura ARJ multicámara completamente perforadas (Oumeraci, 2009).

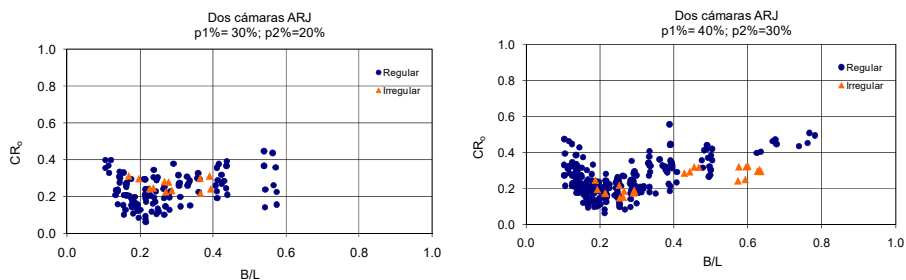


Figura III.19. C_r en función del ancho relativo para diferentes porosidades. Estructura ARJ de dos cámaras completamente perforadas (Garrido, 2012).

Asimismo, las estructuras formadas por múltiples paredes perforadas pueden emplearse para la disipación de ondas en canales y tanques de oleaje (Losada et al, 1993). El diseño óptimo se obtiene disponiendo los paneles con porosidades gradualmente decrecientes en la dirección del oleaje incidente con separaciones entre paneles de 0.88 veces la profundidad¹³⁹ pudiendo alcanzarse un coeficiente de reflexión teórico de tan sólo 0.04 (Twu y Lin 1991).

¹³⁹Obtenido para un rango de profundidades relativas entre 0.05 y 0.5.

III.2.4. Estructuras ARJ con cámaras cerradas superiormente

Habitualmente, la parte superior de las estructuras marítimas en el interior de los puertos se requiere para otros usos, principalmente para manipulación y almacenamiento de mercancías, acceso rodado, etc. Por lo tanto, las oscilaciones en el interior de las cámaras de las estructuras ARJ cerradas superiormente pueden provocar impactos directos de la masa de agua sobre dicho cerramiento o la una excesiva compresión de la masa de aire atrapada entre la masa de agua y la estructura con problemas de seguridad estructural o durabilidad.

La compresibilidad del aire en las cámaras puede modelizarse numéricamente con la ecuación del estado del aire a temperatura constante (Chen et al, 2007). Los resultados muestran incrementos del coeficiente de reflexión debido a la cubierta, minimizándose su efecto al incrementar la distancia entre la cubierta y el nivel del agua en reposo (ver d_3 en la Fig. III.8). La Tabla III.5 muestra el efecto de la cubierta en el coeficiente de reflexión para los casos analizados.

Tabla III.5. Comparación de las estructuras ARJ con y sin cubierta.

Tipología ARJ	Tipo de oleaje	rango d_3 / H	$C_{r, \text{ con cubierta}} / C_{r, \text{ sin cubierta}}$
sin cubierta	oleaje regular	0.333-2.0	1.0
	oleaje irregular	0.5-2.0	1.0
con cubierta	oleaje regular	0.333-2.0	1.0 - 1.3
	oleaje irregular	0.5-2.0	1.0-1.2

III.2.5. Estructuras ARJ con relleno de escollera interior

Ante la falta de estabilidad, puede plantearse el relleno de una estructura ARJ con escollera (Isaacson, 2000; Liu et al, 2007; Altomare y Gironella, 2014; Faraci, 2015).

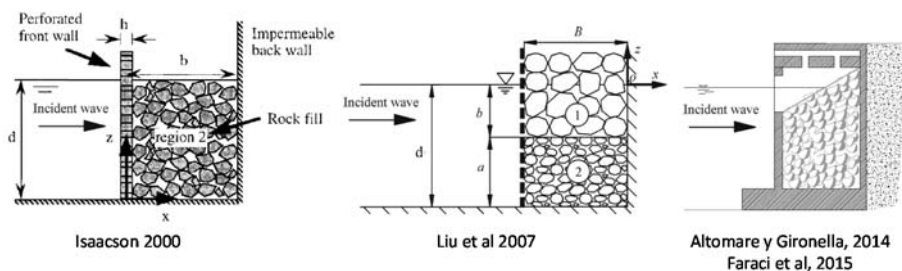


Figura III.20. Esquemas de estructuras ARJ con relleno de escollera.

Con carácter general puede indicarse que el coeficiente de reflexión puede aumentar si el relleno emerge por encima del nivel del agua, sin formar un talud en estructuras con aberturas pequeñas, mientras que las fuerzas sobre la estructura se reducen. La cota de coronación del relleno debe encontrarse sumergida para minimizar la influencia del relleno en el coeficiente de reflexión (ver Fig. III.21).

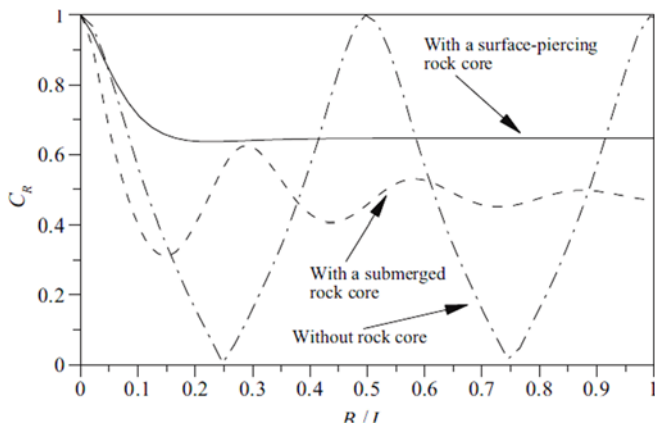


Figura III.21. Respuesta de una estructura ARJ con y sin relleno (Huang, 2011).

Los diseños con mayores aberturas y relleno emergido en talud (Altomare y Gironella, 2014, Faraci et al, 2015) se asemejan a los muelles sobre pilotes o “claraboya” en los que se pretende compaginar la baja reflexión de los taludes porosos para oleaje, con las tipologías muelle de gravedad. Los mecanismos de disipación por pared porosa e interferencia destructiva dejan de ser relevantes¹⁴⁰ pasando a destacar los de disipación por talud y medio poroso.

Los resultados experimentales indican un comportamiento del coeficiente de reflexión decreciente al incrementar $k \cdot d$ hasta $k \cdot d = 1.5$, a partir del cual se mantiene constante o en leve incremento hasta $k \cdot d = 3$ e que se encuentra un máximo y posteriormente vuelve a decrecer para $k \cdot d$ mayores. Los mínimos coeficientes de reflexión obtenidos son algo inferiores a $C_r = 0.4$ con B/L a partir de 0.15 (Faraci, 2015).

III.2.6. Estructuras ARJ con paneles perforados interiores horizontales

La incorporación de paneles horizontales que compartimentan las cámaras de las estructuras ARJ verticalmente tienen un doble efecto: 1) reducen la longitud de onda en la cámara¹⁴¹, con lo que el mínimo puede obtenerse con relaciones B/L menores,

¹⁴⁰Altomare y Gironella (2014) proponen una fórmula en la que no aparece el ancho de cámara como parámetro.

¹⁴¹ Con efecto similar al de la reducción de profundidad en la cámara.

y 2) si el panel es perforado, genera una disipación adicional, con lo que pueden obtenerse diseños con coeficientes de reflexión más reducidos. La propuesta de diseño incluye una porosidad en el panel frontal exterior grande y moderada en el panel horizontal (Liu et al, 2007).

La respuesta típica de una estructura ARJ con y sin panel horizontal ranurado se muestra en la Fig. III. 22, en la que se aprecia la importante reducción que se consigue al incorporar dicho elemento.

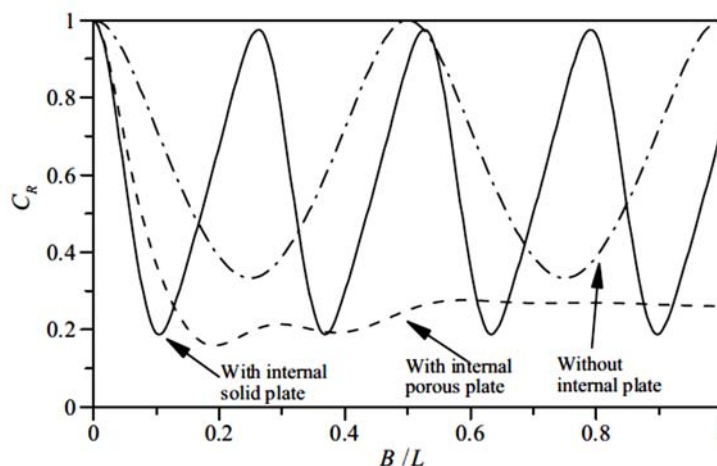


Figura III.22. Respuesta de una estructura ARJ con y sin panel horizontal poroso (Huang, 2011).

III.2.7. Otros diseños particulares de estructuras ARJ

Las variaciones sobre diseños de estructuras ARJ para su utilización en el interior de puertos son numerosas, incorporando otros mecanismos disipativos como los descritos en el apartado III. 1.2.2. A continuación se exponen los resultados de otras estructuras atenuadoras de oleaje particulares, que pueden considerarse basadas o relacionadas con las estructuras ARJ.

III.2.7.1. Creación de circuitos disipativos largos

En el apartado III.2.1 y III.2.2, se muestra cómo la efectividad disipativa de las estructuras de una cámara es muy sensible al ancho de cámara relativa, o lo que es lo mismo, para un diseño con un ancho de cámara determinado, los oleajes con periodos próximos al de resonancia de las cámaras se atenuarán en rango estrecho de periodos alrededor del resonante. Por lo tanto, cuando aparezcan otros periodos distintos del de resonancia, la estructura funcionará de manera semejante a una estructura vertical reflejante.

En el *apartado III.2.3*, se indica que la posibilidad de abarcar un rango más amplio de periodos en la atenuación con estructuras ARJ de múltiples cámaras.

Otra posibilidad es definir distintos anchos de cámara en una misma estructura o en distintas zonas del puerto, de forma que los correspondientes oleajes exciten las cámaras de longitudes resonantes con éstos.

Además, se ha comentado la problemática desde el punto de vista de la estabilidad de la estructura que se produce al aligerar la estructura. Los oleajes asociados a los temporales mayores requieren de anchos de cámara excesivos¹⁴², por lo que la atenuación de temporales podría quedar comprometida.

La problemática indicada puede resolverse mediante la definición de cámaras de varios tamaños y de mayor longitud, mediante el concepto de *circuito* (Medina et al, 2010). La mayor longitud de las cámaras puede simularse mediante la conexión de celdas en distintas direcciones cuya longitud total corresponda aproximadamente¹⁴³ con la de la cámara única deseada (ver *Fig. III.23*). En el caso de circuitos abiertos por los dos extremos la longitud equivalente será aproximadamente la mitad de su longitud.



Figura III.23. Circuitos en un modelo físico a escala en el canal de oleaje y viento del LPC-UPV (Martínez et al, 2010).

Un resultado típico para cajones con varias combinaciones de circuitos se muestra en la *Fig. III.24*, en la que se representa la energía reflejada respecto del ancho relativo de cámara. En la gráfica se aprecia cómo la respuesta del cajón multicircuito M3 es más homogénea para todo el rango de periodos, pudiendo diseñar el cajón específicamente para varios oleajes y para temporales.

¹⁴²Por ejemplo, el ancho de cámara óptimo para atenuar un oleaje de $T=15$ s con una profundidad de cámara de 3 m requeriría de más de 3 filas de celdas de una estructura vertical de cajones.

¹⁴³Igual si se suponen despreciables las pérdidas por cambios de dirección y de contracción y expansión del flujo, así como la energía radiada por reflexión en los cambios de dirección y/o sección.

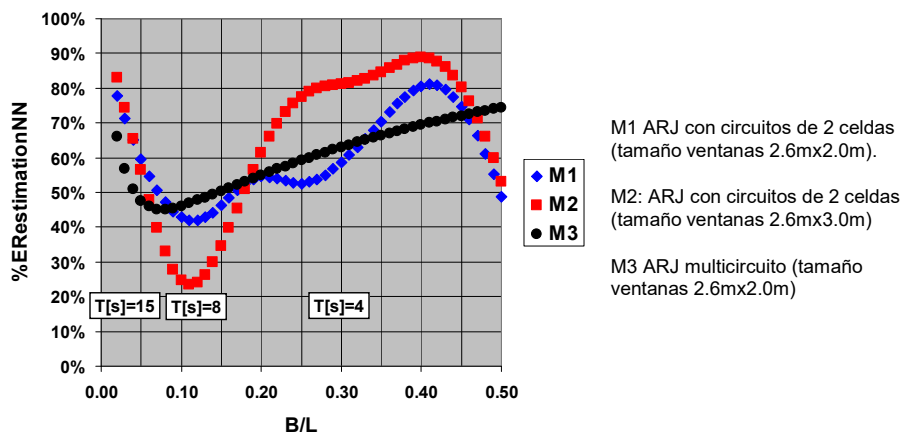


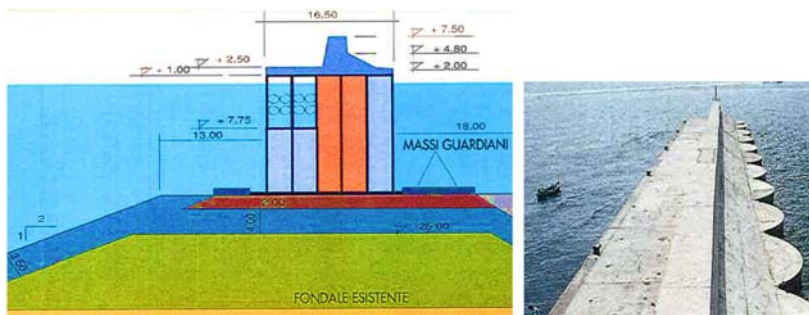
Figura III.24. Respuesta de varios cajones con combinaciones de circuitos distintas (Martínez et al, 2010).

El concepto de circuito será empleado en el *apartado III.3* y con más detalle en los *Capítulos IV y V*, para su extensión a la definición de estructuras ARJ para la atenuación de ondas largas en el interior de los puertos.

III.2.7.2. Incorporación de geometrías en planta para la dispersión direccional de la reflexión

La disposición de geometrías exteriores semicirculares o cilíndricas¹⁴⁴, cuyas paredes pueden ser ranuradas, con cámaras interiores o sin ellas, producen dispersión direccional de la energía reflejada creando patrones complejos de interferencia con el oleaje incidente, generalmente inferiores a los que se producirían con reflexión lineal sobre un plano. Estas tipologías se han descrito para su empleo como diques, por lo que para su utilización como muelles precisarían de la incorporación de elementos lineales horizontales en coronación (viga de borde) para conformar una línea de atraque así como elementos verticales para alojar los dispositivos de atraque (defensas). La *Fig. III.25* muestra ejemplos de paramentos exteriores con formas curvas.

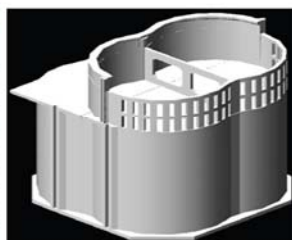
¹⁴⁴Este tipo de estructuras requiere la modelización física a escala 3D para evaluar su respuesta disipativa, así como debido a la dispersión direccional del oleaje y de su reflexión. Álvarez et al (2016) describen la experimentación 3D sobre una estructura formada por pantallas cilíndricas perforadas en el extremo de un dique.



dique Duca degli Abruzzi del Puerto de Nápoles (Italia)



dique del Puerto de Beirut (Líbano)



dique del Puerto de Tánger (Marruecos)



dique del puerto de Nagashima (Japón).

Figura III.25. Ejemplos de geometrías en planta para la dispersión direccional de la reflexión

III.2.7.3. Incorporación de geometrías en planta para la creación de flujos circulares de eje vertical

La geometría de las estructuras en planta puede diseñarse con el objeto de provocar la disipación de energía en la formación de remolinos o por efectos inerciales en la transformación del momento angular en movimientos de eje vertical. Diseños como los formados por estructuras cilíndricas (Garrido et al, 2009), como el bloque ARPA (González-Escrivá et al, 2007 y Garrido et al, 2009) o el bloque IGLOO (Shiraishi et al, 1975), provocan la creación de movimientos de eje vertical o remolinos (Polimón, 2002).

La Fig. III.26 muestra el esquema del bloque¹⁴⁵ IGLOO (Shiraishi et al, 1976). Mediante el apilado siguiendo un patrón preestablecido se conforma una estructura con huecos tridimensionales. La geometría del IGLOO provoca un giro que en el interior de las cavidades entre bloques creando mayor disipación en la fricción con los contornos.

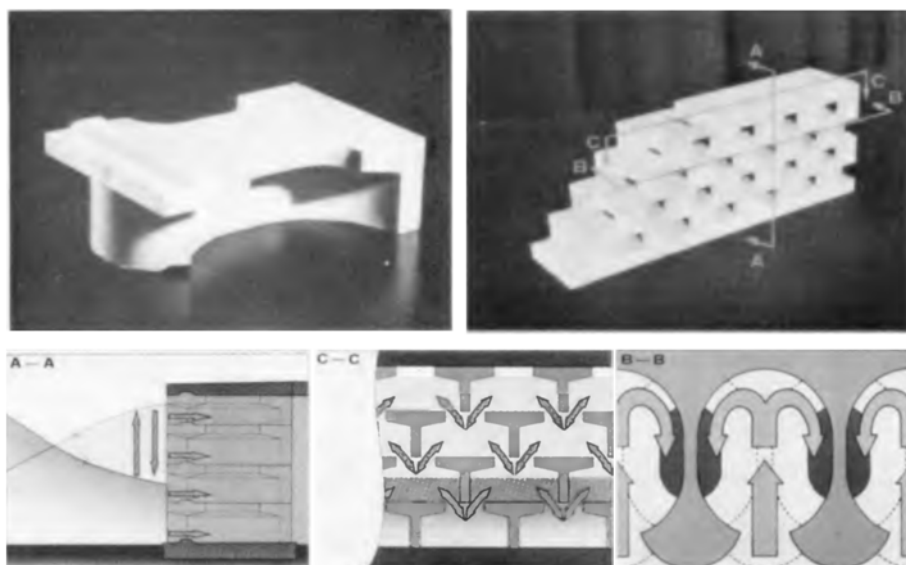


Figura III.26. Estructura ARJ con bloque IGLOO (Shiraishi et al, 1975)

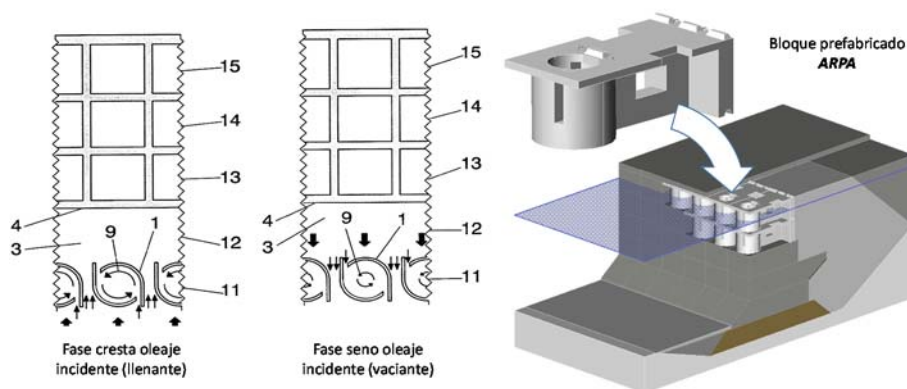


Figura III.27. Estructura ARJ formada por bloques ARPA (González-Escrivá, 2007).

¹⁴⁵Existen numerosos bloques que conforman estructuras marítimas que atenúan el oleaje, generalmente para periodos muy cortos.

La Fig. III.27 muestra la dinámica de las cámaras cilíndricas del bloque ARPA en la que el diseño de las aberturas provoca el giro del flujo en su interior en el sentido contrario al de las agujas del reloj en la fase cresta del oleaje incidente, disminuyéndose la intensidad del flujo llegando a invertirse el sentido al descender el nivel de agua exterior en la fase seno. Se producen movimientos de eje vertical con sentidos de giro cambiantes en cada oscilación. La inercia del movimiento circular así creado provoca una diferencia de niveles que se traduce en un desfase actuando de forma similar a una interferencia destructiva¹⁴⁶.

Los resultados del ajuste realizado sobre los datos experimentales mediante redes neuronales podadas con estrategias evolutivas (Medina et al, 2002) se muestran en la Fig. III.28 en la que se representa la energía reflejada en función del ancho relativo de cámara corregido, $(B/L)^*$. La gráfica proporciona la anchura corregida $(B/Lc)^*$ a partir de los adimensionales $d/d1$, B/Lc y $k \cdot d$, obteniéndose a continuación la estima neuronal de la energía reflejada corregida $(ERnn\%)*$ para el cálculo de la energía reflejada $ER\%$.

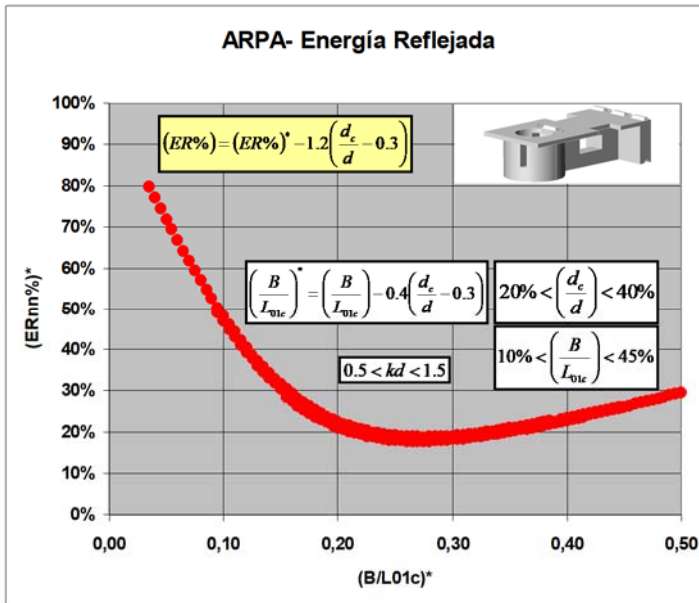


Figura III.28. Relación entre la energía reflejada y el ancho relativo de cámara para el diseño ARJ con perforación parcial formado por elementos modulares ARPA (González-Escrivá et al, 2007).

¹⁴⁶Es necesaria una mayor investigación al respecto para definir las características geométricas que relacionarían la geometría de las cámaras cilíndricas con las características del flujo circular "resonantes" que producirían la mayor atenuación.

La Fig. III.29 representa un diseño de pantallas cilíndricas con paramento impermeable posterior (Polimon, 2002; Vázquez y Negro, 2016). El flujo al atravesar pantallas cilíndricas o rectangulares produce disipación por remolinos tras el paso de la corriente. En el caso de pantallas cilíndricas existirá, además, radiación por reflexión con carácter direccionalmente dispersivo.

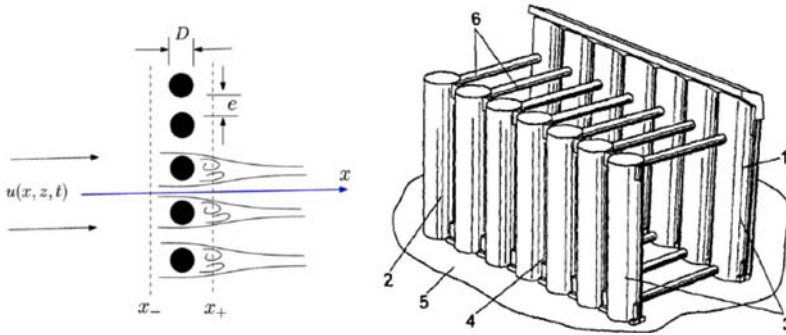


Figura III.29. Estructura ARJ de pantallas cilíndricas (Polimón, 2002)

III.2.7.4. Incorporación de rugosidad artificial que incremente la disipación por fricción

La incorporación de elementos que incrementen la rugosidad favorece la disipación de energía. Neelamani y Sandhya (2003) investigan la reflexión del oleaje (regular e irregular) en paredes dentadas y serradas (ver Fig. III.30).

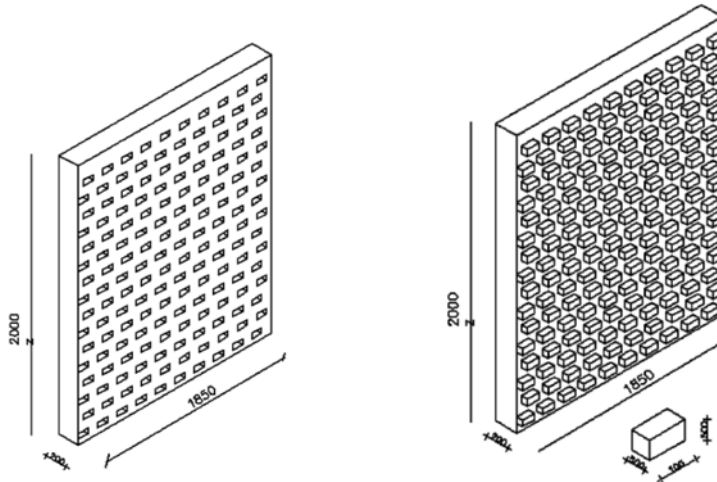


Figura III.30. Paneles verticales serrados y dentados para incrementar la fricción (Neelami y Sandhya, 2003)

La respuesta experimental se analiza comparándose con la pared plana, presentando fórmulas para predecir el coeficiente de reflexión en cada caso como resultado de un análisis de regresión múltiple (ver *Tabla III.6*).

En general, el dique serrado funciona mejor que el plano o el dentado, reduciendo la reflexión del oleaje y en particular es más efectivo para olas largas. Los parámetros que gobiernan el problema son: la profundidad relativa (d/L), y la dimensión característica de los bloques disipadores. El coeficiente de reflexión para pared vertical dentada se mueve en un rango del coeficiente de reflexión 0.6 - 1.0, y una pared vertical serrada en un rango 0.45 - 0.98, para condiciones análogas para cualquier d/L y H/L .

Tabla III.6. Coeficientes de reflexión para paneles dentados y serrados verticales (Neelami y Sandhya, 2003).

Tipología ARJ	C_r	R^2	d/L
pared vertical plana	$0.95 \cdot (d/L)^{-0.02}$	0.62	0.09-0.45
pared vertical dentada	$0.52 \cdot (d/L)^{-0.28}$	0.80	0.09-0.45
pared vertical serrada	$1.09 - 1.33 \cdot (d/L)$	0.91	0.09-0.45

Asimismo, típicamente se propone la incorporación de elementos/obstáculos al flujo¹⁴⁷ que aumenten la disipación mediante una rugosidad añadida (Garrido et al, 2009 a, b y c).

III.2.7.5. Incorporación de elementos para el aprovechamiento energético de las olas

La incorporación de elementos que mediante mecanismos, flotadores u osciladores extraigan energía del movimiento ondulatorio redundará por la ecuación de conservación de la energía (*Ec. III.1*) en una menor reflexión. Además, algunos de ellos, como los basados en la generación de ondas por un cuerpo flotante en oscilación puede además producir disipación de energía por interferencia destructiva con las ondas incidentes y las radiadas por el flotador (Seymour, 1992). Sin embargo, su menor rendimiento energético en el interior de un puerto, así como la necesidad de adaptación a la funcionalidad de las obras de atraque y amarre desaconsejan su uso en el interior de los puertos.

¹⁴⁷Un estudio semi-empírico correspondiente a la atenuación de oleaje en un canal rectangular es llevado a cabo por Battjes (1965).

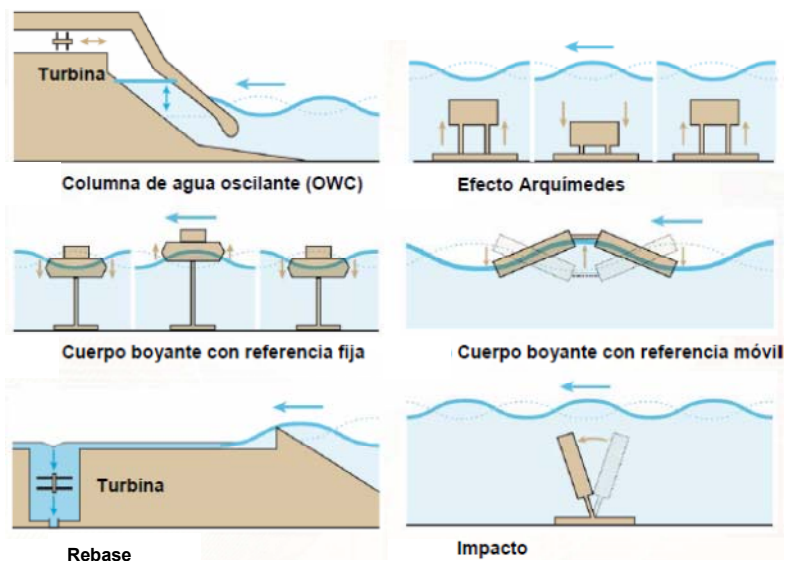


Figura III.31. Sistemas de aprovechamiento de la energía de las olas del mar según el principio de captación (Ibañez, 2008)

III.2.8. Efecto de la oblicuidad y aleatoriedad del oleaje

Las condiciones estándar analíticas y experimentales expuestas anteriormente se asocian a las correspondientes a oleaje incidiendo perpendicularmente a la estructura con ondas simples armónicas. A continuación se indican los efectos que la dirección del oleaje y la irregularidad del oleaje tienen sobre la respuesta disipativa de las estructuras antirreflejantes.

III.2.8.1. Efecto de la oblicuidad del oleaje

Para un valor de B/L , la velocidad perpendicular disminuye con el ángulo de incidencia¹⁴⁸, con lo que la disipación se reduce consecuentemente.

El coeficiente de reflexión para oleajes oblicuos puede estimarse (Liu et al, 2009):

$$C_{R,\theta} = \frac{\cos\theta - G \cdot [1 - i \cdot \cotg(k \cdot B \cdot \cos\theta)]}{\cos\theta + G \cdot [1 + i \cdot \cotg(k \cdot B \cdot \cos\theta)]} \quad (\text{III.16})$$

donde el número de onda y la longitud de onda en la dirección perpendicular son, respectivamente:

$$k_{\perp} = k \cdot \cos\theta \quad (\text{III.17})$$

$$L_{\perp} = L \cdot \cos\theta \quad (\text{III.18})$$

¹⁴⁸Ángulo entre la creta de la ola y la alineación frontal de la estructura.

La Fig. III. 32 muestra un resultado típico del efecto de la oblicuidad en la respuesta de una estructura ARJ, donde se aprecia como el coeficiente de reflexión se incrementa con la oblicuidad del oleaje.

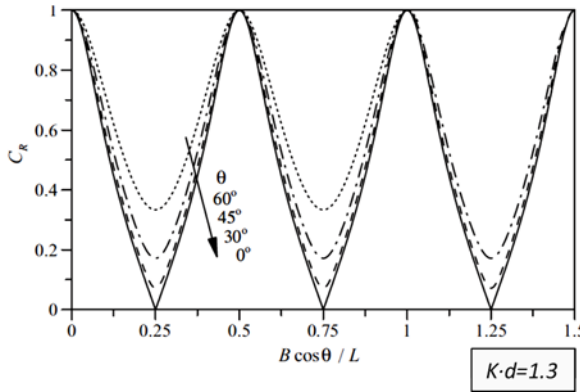


Figura III.32. Respuesta típica de estructura ARJ totalmente perforada con oleaje oblicuo (Huang, 2011)

La existencia de paredes interiores en las estructuras ARJ, perforadas o no, complica el flujo en el interior de la cámara. Las paredes transversales perforadas pueden disipar mayor cantidad de energía en el mismo sentido en el que se produciría con las mismas paredes en el caso de flujo perpendicular (Liu et al, 2016).

III.2.8.1. Efecto de la irregularidad del oleaje

El coeficiente de reflexión promediado en frecuencias (Goda, 2010) puede definirse según la siguiente expresión:

$$\bar{C}_R = \sqrt{\frac{m_{0,r}}{m_{0,i}}} \tag{III.19}$$

Generalmente los coeficientes de reflexión de oleaje irregular son mayores que los obtenidos para oleaje regular (ver Fig. III.33).

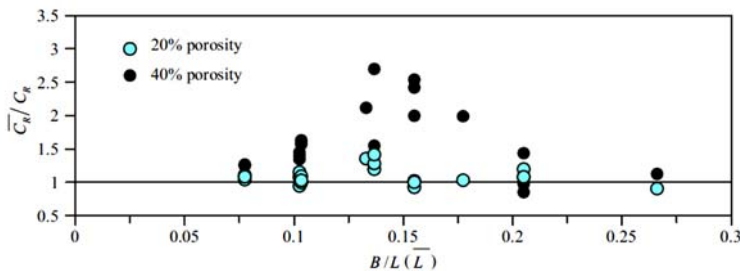


Figura III.33. Coeficientes de reflexión por oleaje regular e irregular (Huang, 2011)

III.3. Estructuras antirreflejantes para ondas de largo periodo.

La reducción de las ondas largas en el interior de los puertos puede plantearse con dos alternativas que pueden ser complementarias:

- 1) Limitar la entrada de la onda larga al interior del puerto mediante la adecuada disposición de las obras de abrigo¹⁴⁹ pudiendo incluir elementos, en la bocana o en el canal de acceso, que bloqueen selectivamente el rango de frecuencias de las ondas largas sin perturbar la navegación (Nakamura, 1998).
- 2) Atenuar la onda de largo periodo dentro del puerto mediante la incorporación de elementos de bajo coeficiente de reflexión para dichas frecuencias, en los contornos portuarios, de forma que se modifique efectivamente la distribución espacial de la altura de onda larga.

Los métodos convencionales para la absorción de la energía del oleaje no son, con generalidad, aplicables a la atenuación de la onda larga en los puertos, debido principalmente al periodo de éstas¹⁵⁰. Afortunadamente, una pequeña reducción en la altura de onda puede corregir o reducir a niveles admisibles los efectos de la resonancia¹⁵¹.

III.3.1. Elementos para el bloqueo selectivo de las ondas largas a la entrada de los puertos

La aplicación de resonadores para amortiguar determinados rangos de frecuencias actuando como filtros es habitual en electrónica y acústica, siendo el resonador de Helmholtz un ejemplo clásico de filtro selectivo para un rango de frecuencias¹⁵².

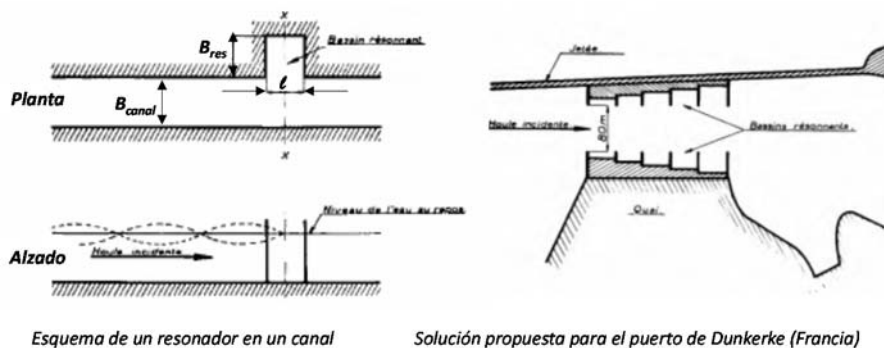
El concepto puede ser extendido a los puertos y canales de navegación para la reducir el oleaje a la entrada de éstos, sin obstaculizar la navegación. Básicamente queda constituido geométricamente como un ramal rectangular en un canal estrecho cuyos parámetros principales se muestran en la *Fig. III.34*.

¹⁴⁹El uso de pantallas puede ser también un elemento a considerar (Atkins, 2015; Huang, 2011) aunque con un mayor coste al ubicarse en el exterior del puerto u obstaculizando la navegación si su ubicación recae en la bocana o en el canal de acceso.

¹⁵⁰Los taludes necesarios para la rotura de las ondas largas han de ser muy tendidos, por lo que la reflexión de las ondas largas en las estructuras marítimas convencionales puede considerarse total ($C_r = 1$).

¹⁵¹Puesto que son amplificadas con cada reflexión.

¹⁵²Puede consultarse a Kinsler (2010) para más información.



Esquema de un resonador en un canal

Solución propuesta para el puerto de Dunkerke (Francia)

Figura III.34. Resonadores en canal y puerto (Valenbois, 1954)

Los resonadores pueden clasificarse en función de la longitud de sus lados (James, 1970)¹⁵³:

- 1) Resonador largo y estrecho: en el que la oscilación tiene lugar en la dirección perpendicular a la de las ondas en el canal principal.
- 2) Resonador corto y ancho: en el que la oscilación es paralela a las ondas en el canal principal.
- 3) Resonador intermedio: con comportamiento intermedio (ver Fig. III.35).

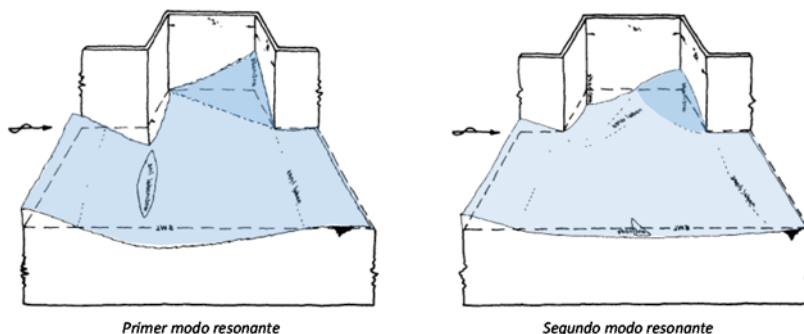


Figura III.35. Modos principales de resonancia canal-resonador (James, 1968)

El resonador absorbe energía del canal al oscilar resonantemente, radiándola nuevamente al canal principal, con un desfase que provoca que la radiación se dirija hacia el exterior, dejando de ser efectivo para longitudes de onda inferiores al ancho del canal de entrada¹⁵⁴. El efecto de atenuación se describe mediante el coeficiente de transmisión, C_{trans} .

¹⁵³Existe una teoría unidimensional de onda plana para determinar los valores geométricos del resonador en los casos 1 y 2 (James, 1970). Posteriormente, Wu (1992) desarrolla una teoría bidimensional que se extiende para el dimensionamiento de los 3 casos.

¹⁵⁴Puede "desajustarse" hacia bajas frecuencias con resonadores a menor profundidad que el canal (James, 1970).

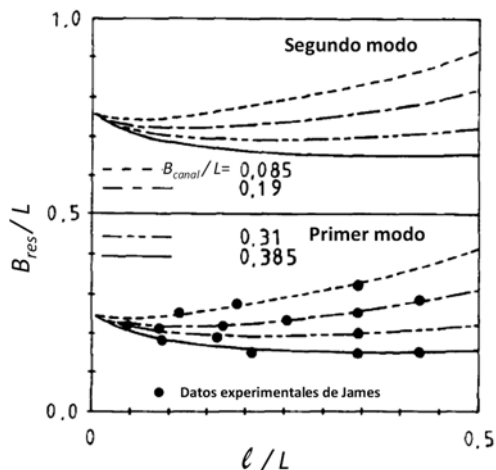


Figura III.36. Valores en resonancia obtenidos con modelo analítico (Wu 1992)

Con carácter general, el rango de frecuencias para un determinado coeficiente de transmisión depende exclusivamente de las características geométricas B_{res}/L y B_{canal}/L . El parámetro de ajuste que optimizar la transmisividad en resonancia l/L depende de B_{canal}/L . El modo principal de resonancia, se producirá para valores $B_{res}/L < 0.5$.

De forma similar al estudio de la resonancia en dársenas acopladas, el estudio y diseño de los resonadores como filtros selectivos puede llevarse a cabo por analogía con la teoría eléctrica, es la denominada teoría del filtro de oleaje (Mochizuki, 1990; Nakamura et al, 1996 y 1998), con la que puede diseñarse una batería de resonadores¹⁵⁵ para filtrar un mayor rango de frecuencias $f_c < f < f_\infty$.

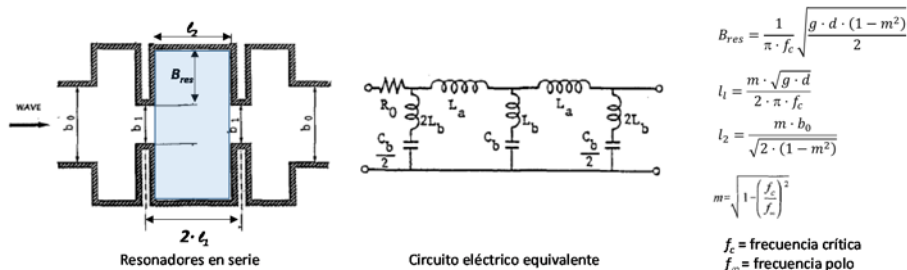


Figura III.37. Analogía circuito eléctrico de la teoría del filtro de oleaje (Mochizuki 1990)

¹⁵⁵Nakamura (1996) indica que es más práctico y económico disponer un único resonador en lugar de una batería (dársena sombreada en la Fig. III.36, con $b_0=b_1$).

A partir de la teoría del filtro del oleaje, Nakamura y Morita (1998) proponen un diseño teórico que verifica experimentalmente para la atenuación de ondas largas en el que el resonador doble se dispone a modo de puerto exterior. La Fig. III. 38 muestra una planta del puerto y la respuesta de la transmisividad para distintos periodos y profundidades.

Con un proceso de prueba y error (Latt y Nakamura, 2011), con base en diseños realizados con la teoría del filtro de oleaje proponen un diseño para onda de tsunami en el que se introducen dos paredes adicionales paralelas al canal de entrada que permiten optimizar la eficiencia del resonador para ondas muy largas. La Fig. III. 39 muestra el nuevo diseño en comparación con el resonador rectangular, destacando las posiciones de los nodos y antinodos, así como el resultado expresado en términos del valor medio de la onda sin el resonador respecto del valor con el resonador.

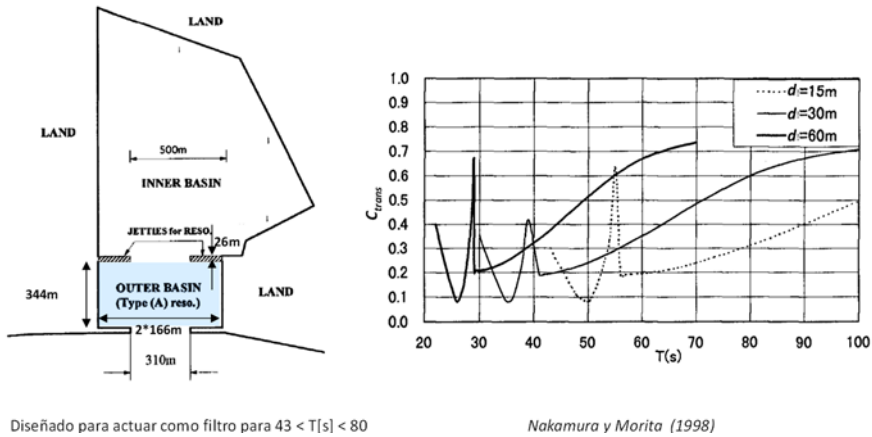


Figura III.38. Aplicación de la teoría de filtro de oleaje al diseño de un resonador para onda larga como puerto exterior (Nakamura y Morita, 1998)

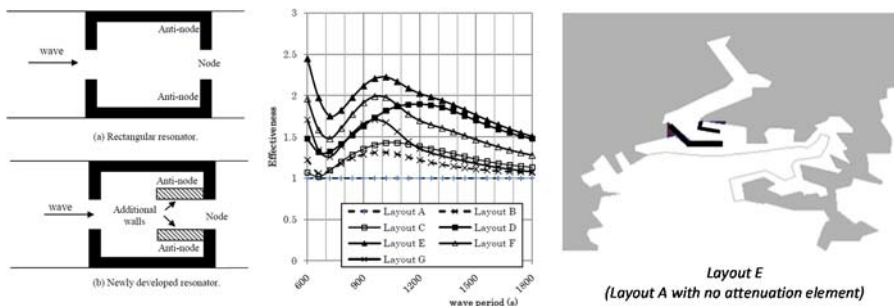


Figura III.39. Diseño de resonador para absorber onda de tsunami (Latt y Nakamura, 2011). Solo se muestra la geometría para Layout E.

III.3.2. Elementos con bajo coeficiente de reflexión para la atenuación de las ondas largas en el interior de los puertos

El limitado espacio marítimo en los puertos y adaptabilidad a la funcionalidad requerida en los espacios portuarios interiores delimita las características que, adicionalmente a la de baja reflexión¹⁵⁶, deben verificar los elementos que se dispongan en el interior de los puertos para la atenuación de las ondas largas. En primer lugar, el espacio a ocupar por dichos elementos ha de ser reducido para no limitar en exceso el espejo de agua disponible en la dársena¹⁵⁷ y no crear obstáculos que dificulten la navegación. En segundo lugar, dependiendo de su funcionalidad, si la ubicación en la que se conseguirá la mayor efectividad con la instalación del elemento, ha de permitir el atraque y amarre de barcos y la ubicación de medios de manipulación de mercancías; debe permitir que el barco se aproxime a la estructura, y pueda realizar las operaciones mencionadas. En tercer lugar, también los espacios terrestres portuarios son importantes, por lo que, generalmente, será necesario que la parte superior del elemento esté cubierta y sea utilizable para circulación, manipulación o almacenamiento. En cuarto y último lugar, si se dispone el elemento en la cara interior al puerto de un dique de abrigo, deberá considerarse la estabilidad frente al posible rebase.

Los sistemas de absorción de ondas de largo periodo propuestos en la literatura y sus principales limitaciones respecto de los condicionantes anteriores¹⁵⁸, consisten básicamente en:

- 1) Estructuras porosas compuestas de escolleras o bloques de hormigón.
La disipación tiene lugar principalmente por fricción en el medio poroso, por lo que el necesario desarrollo medido en la dirección de la onda hace generalmente inviable su utilización en zonas con poco espacio. Asimismo, su frente en talud es incompatible con la función de muelle, por lo que su ubicación preferente se propone en ubicaciones en las que no esté prevista dicha funcionalidad.
- 2) Estructuras ARJ combinadas con estructuras porosas de escolleras o bloques de hormigón.
Típicamente, consiste en una estructura ARJ que permite el flujo a su través frontalmente yuxtapuesta a un relleno poroso en el trasdós, o viceversa. La ocupación en planta puede ser importante y su posibilidad de generar explanada está, generalmente, comprometida.
- 3) Estructuras ARJ ranuradas con paredes oblicuas.

¹⁵⁶Hiraishi (2006) propone como límite de la amplitud de la onda larga en el interior de puertos un valor de 10 cm.

¹⁵⁷La referencia inevitable son los muelles verticales, habituales en los puertos.

¹⁵⁸Se descartan las pantallas y otros elementos cuya integración con la navegación en el interior del puerto es más complicada, además de tener una elevada transmisibilidad.

Provocan giro del flujo de eje vertical: estructura ARJ, con una ranura vertical central delimitada por dos paredes verticales oblicuas. Esta geometría genera remolinos turbulentos y flujos de eje vertical, en las fases llenantes y vaciantes de la cámara, con la consiguiente problemática asociada a dichas corrientes que pueden perturbar a las embarcaciones próximas o provocar socavaciones.

- 4) Estructuras antirreflejantes que provocan giro de flujo de eje horizontal. La entrada sumergida de la masa de agua genera un flujo rotatorio de eje horizontal en una cámara interior. Al igual que en caso anterior, deben considerarse las corrientes llenantes y vaciantes.
- 5) Estructuras ARJ de circuitos disipativos largos. Estructuras ARJ en las que se alarga el ancho de la zona de disipación mediante la creación de circuitos en los que se obliga al flujo a cambiar de dirección.

III.3.2.1. Estructuras porosas compuestas de escolleras o bloques de hormigón.

Este tipo de estructuras disipan la energía por fricción en la superficie y en el interior de la estructura porosa en la dirección de avance de la onda; debido a la longitud de la onda el desarrollo para conseguir el amortiguamiento será importante. Dado que la posición de la cota de coronación respecto del nivel del agua puede diferenciar de forma importante la fricción en el exterior y por ello el correspondiente coeficiente de reflexión, pueden clasificarse en emergidas y sumergidas.

- Estructuras porosas emergidas
La figura III.40 representa un esquema típico de estructuras porosas, con talud frontal y coronación emergida, en las que las respuestas disipativas se muestran por referencia al coeficiente de reflexión para diversos periodos y anchos.
La mayor reflexión de la estructura con paramento interior impermeable puede aprovecharse para provocar interferencia destructiva con el oleaje incidente, aunque generalmente provoca mayor coeficiente de reflexión que la estructura permeable con dos taludes. La complejidad en la determinación del ancho equivalente para la estimación del desfase de la onda reflejada requiere de experimentación.

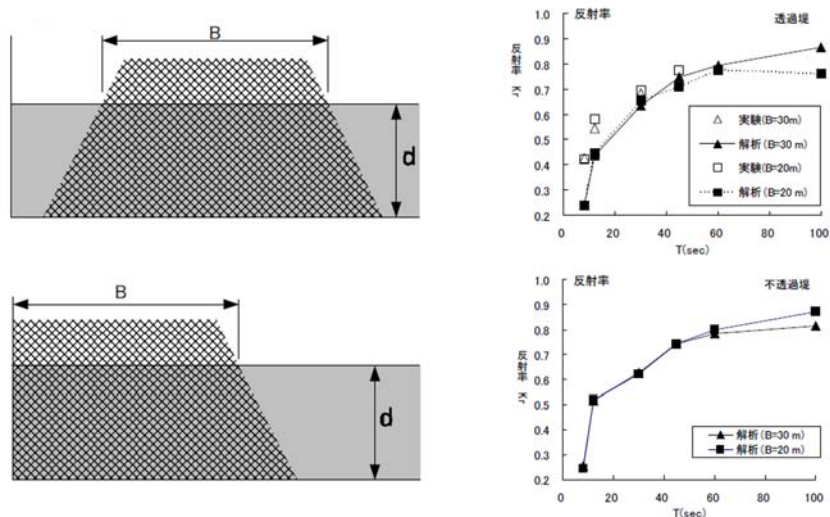


Figura III.40. Respuestas disipativas de estructuras porosas emergidas a 10 m de profundidad (Hiraishi et al, 2009).

- Estructuras porosas sumergidas

La Fig. III.41 reproduce comparativamente el esquema de una estructura porosa emergida y otra con la coronación a nivel del mar para una ubicación típica en el trasdós de una obra de abrigo.

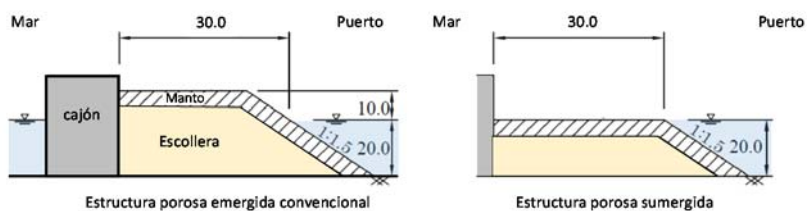


Figura III.41. Estructura porosa emergida y “sumergida” (con coronación a nivel del agua).

La respuesta de las estructuras de la Fig. III.41 se muestra en la Fig. III.42, donde se destaca la mayor disipación de las estructura con la coronación a nivel de la superficie libre con menor diferencia en los periodos mayores.

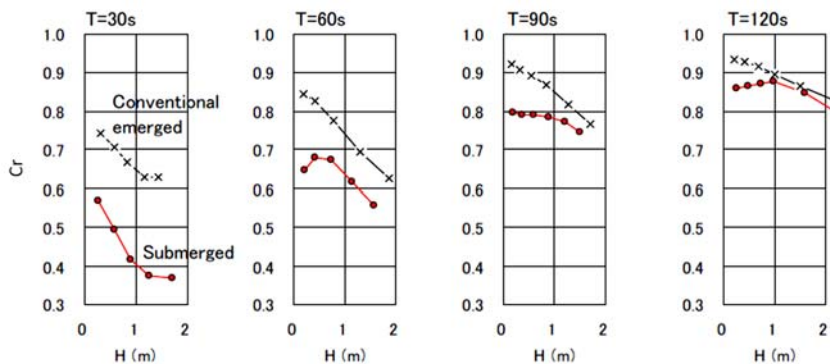


Figura III.42. Comparativa de la respuesta de las estructuras emergida y con cota de coronación a nivel del agua para distintos periodos de onda incidente (Tanaka et al, 2014)

Si la estructura sumergida varía su cota de coronación en ± 2 m respecto de la situación de referencia, en la que la cota de coronación se encuentra en la superficie libre en reposo, la estructura sumergida rápidamente pierde la ventaja mostrada en la Fig. III.42, reflejando de forma prácticamente idéntica como puede apreciarse en la Fig. III.43, por lo que su empleo se condiciona a zonas con marea reducida.

En la condición ideal de referencia, con la coronación a nivel del agua, para idénticos niveles de reflexión, la relación de anchos de la coronación de las estructuras porosas sumergidas respecto de las emergidas puede ser de hasta 1:2.

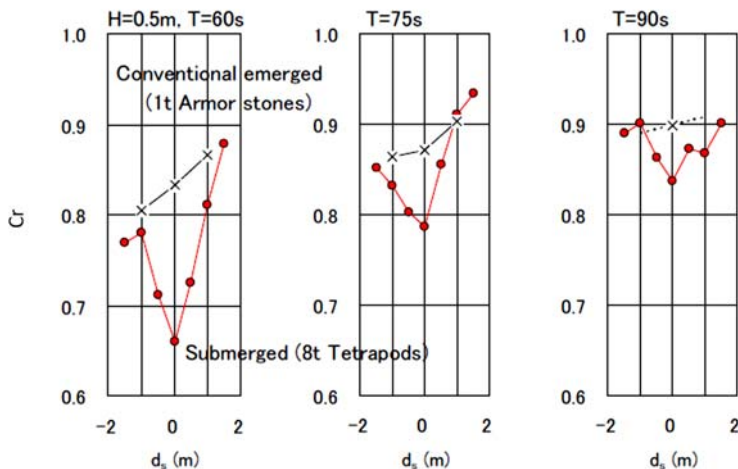


Figura III.43. Efecto de la variación del nivel de agua respecto de la cota de coronación (Tanaka et al, 2014)

Puesto que su utilización típica la sitúa en el trasdós de las obras de abrigo, deberá tenerse especial precaución en la consideración del rebase para la estabilidad de las piezas del manto.

III.3.2.2. Estructuras ARJ combinadas con porosas compuestas de escolleras o bloques de hormigón.

La combinación entre estructuras ARJ permeables, que permiten el flujo a través de sus paredes frontal y trasera¹⁵⁹, con rellenos interiores o posteriores de escollera (ver Fig. III-41), potenciará los mecanismos de disipación permitiendo reducir la extensión respecto de las estructuras porosas de escollera del apartado III.3.2.1.

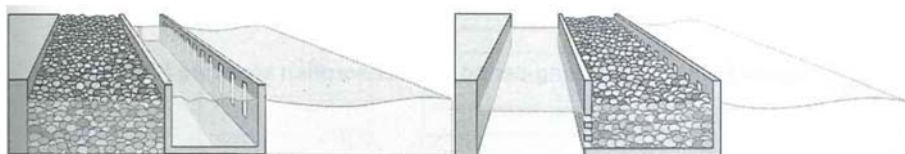


Figura III.44. Estructuras ARJ combinadas con porosas de escollera o bloques de hormigón (Ohshima et al, 2007).

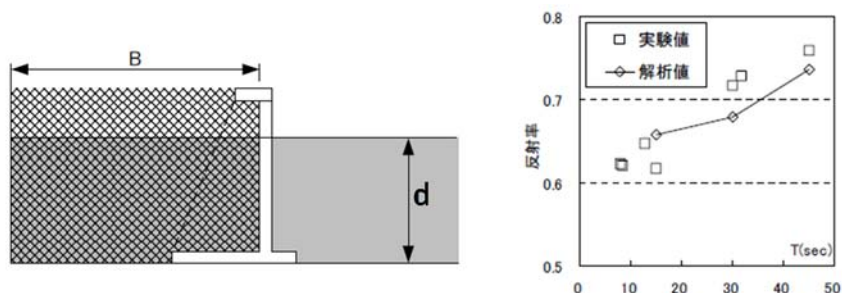


Figura III.45. Muro en L permeable que sustenta a una estructuras porosas de escollera o bloques de hormigón. C_r vs $T[s]$ (Hiraishi et al, 2009).

La eficacia para ondas largas es bastante similar en los elementos porosos con estructura yuxtapuesta ARJ o sin ella, divergiendo para ondas de menor periodo como se muestra en la Fig. III.46.

¹⁵⁹En el límite cuando el ancho de la estructura ARJ es igual al espesor de una de sus paredes, se tiene una pantalla o muro en L, ranurada o perforada, que soporta una estructura porosa formada por escollera o bloques de hormigón en su trasdós (ver Fig. III. 45).

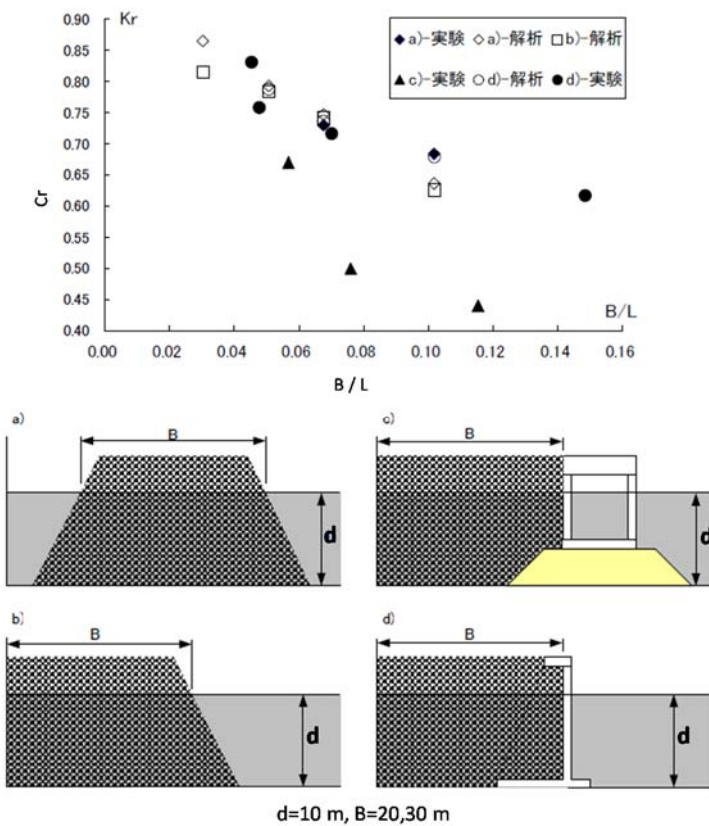


Figura III.46. Comparativa de distintas estructuras porosas respecto del coeficiente de reflexión frente al ancho relativo B/L (Hiraishi et al, 2009).

III.3.2.3. Estructuras ARJ OWLS¹⁶⁰.

Las estructuras OWLS, consisten en una cámara con una única abertura ranurada, con porosidad baja, formándose una contracción y rápida expansión en los flujos llenante y vaciante con niveles distintos en el exterior e interior de la cámara (ver Fig. III.47). Las paredes frontales oblicuas favorecen la formación de remolinos y flujo rotatorio de eje vertical, alternante en cada fase, que incrementa el recorrido de las partículas en la cámara y por lo tanto la fricción, además de generar un desfase por la reflexión y las componentes inerciales del flujo.

¹⁶⁰Denominadas por sus creadores estructura ranurada de pared oblicua oblicuas, *Oblique Wall Slit Structure* u OWLS

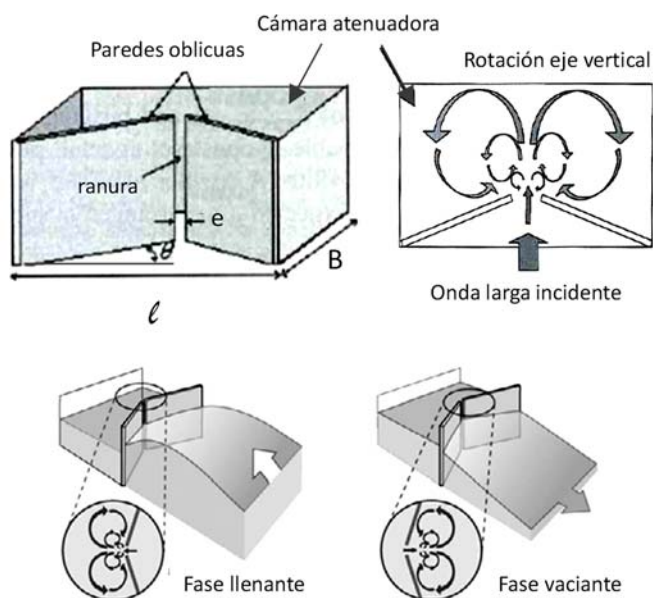


Figura III.47. Estructura ARJ OWLS (Ohshima et al, 2009; Nakahima et al, 2011).

Los parámetros geométricos de la estructura OWLS de la Fig. III.48 han sido optimizados mediante experimentación física a escala. Los resultados de los coeficientes de reflexión de dos estructuras OWLS, una con paramentos oblicuos dotados de características absorbentes para la onda corta con el objetivo de mejorar asimismo el comportamiento frente al oleaje, se presentan comparativamente.

Nakahima et al, 2011 estima que para idéntica respuesta disipativa, el ancho de la estructura OWLS puede ser comparativamente menor que las correspondientes a estructuras porosas con y sin estructuras ARJ yuxtapuestas (ver Fig. III.49).

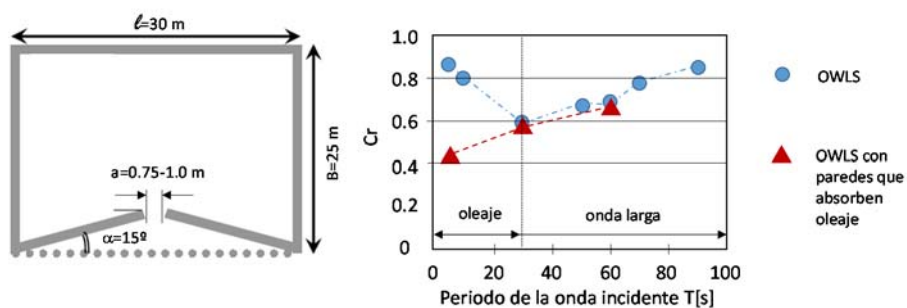


Figura III.48. Respuesta de la estructura OWLS (Nakahima et al, 2011).

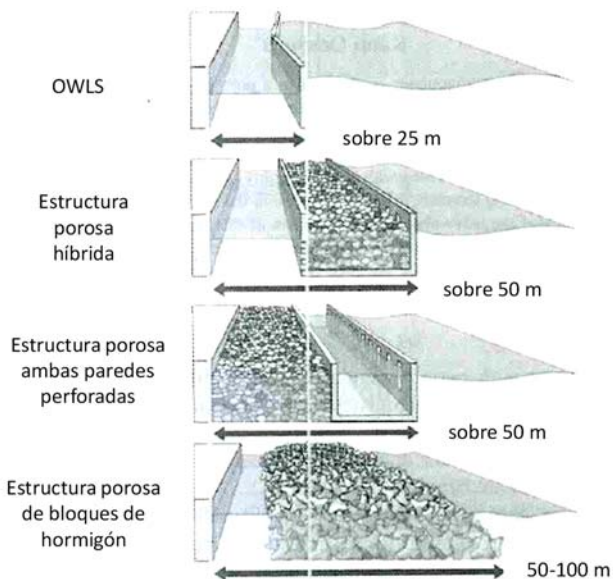


Figura III.49. Anchura para una misma respuesta disipativa (Nakahima et al, 2011).

III.3.2.4. Estructuras atenuadoras de onda larga que provocan giro de flujo de eje horizontal.

La Fig. III.50 representa una estructura atenuadora de onda larga que provoca giro de flujo de eje horizontal, que los autores denominan ECO Breaker (Cho y Kim, 2008).

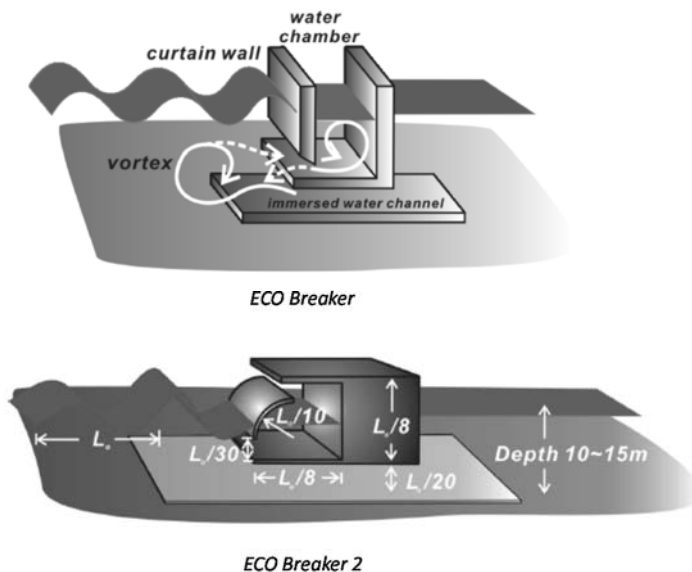


Figura III.50. Estructuras ECO Breaker y ECO Breaker 2 (Cho y Kim, 2008).

La estructura dispone de una cámara y una pantalla emergida no alcanzando el fondo, recta y vertical en la propuesta inicial y curva en la propuesta ECO Breaker 2. La abertura en forma de ranura, es horizontal, y se define entre la parte inferior de la pantalla y el plano inferior que define el plano inferior de la cámara interior (ver Fig. III.50). Las dimensiones correspondientes al diseño ECO Breaker 2, en función de la longitud de onda del oleaje incidente, son los valores propuestos por los autores en base a experimentación física y numérica con modelo SPH-LES.

La respuesta del diseño propuesto ECO Breaker 2 se muestra en la Fig. III.51, con un valor mínimo del coeficiente de reflexión de hasta 0.18. Sin embargo, no se indica la dependencia del coeficiente de reflexión indicado con el periodo de la onda, por lo que no puede utilizarse dicho valor para la comparación con otros sistemas cuyos valores del coeficiente de reflexión se haya obtenido con periodos asociados a ondas de infragravedad.

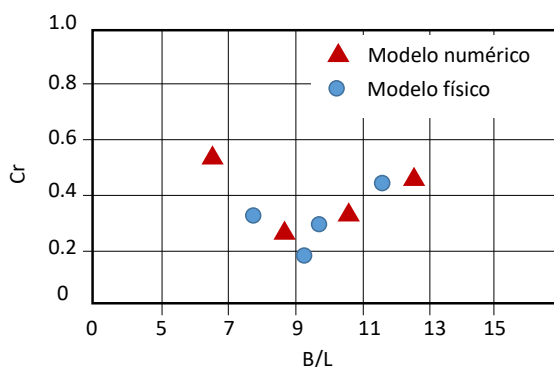


Figura III.51. Respuesta ECO Breaker 2 (Cho y Kim, 2008).

III.3.2.1. Estructuras ARJ de circuitos disipativos largos

González-Escrivá y Medina (2012) presentan una nueva estructura marítima, constructiva y económicamente viable (Martínez et al., 2010), compatible con la tipología vertical de muelle, con cámaras de unidades múltiples circulares basada en concepto de circuito (ver apartado 3.2.7.1; Medina et al., 2010 y 2016) para la atenuación de ondas de baja frecuencia.

En el apartado III.2.7.1 se plantean distintos problemas encontrados en las estructuras ARJ para la absorción de energía del oleaje: 1) la falta de efectividad en un mayor rango de periodos, y 2) la imposibilidad de atenuación eficiente¹⁶¹ de oleajes de temporales, por necesidad de un ancho excesivo de cámara.

¹⁶¹Con la relación B/L óptima.

Como se detallará en el *Capítulo IV*, el concepto de circuito, permite atenuar oleajes más allá de las dimensiones habituales de las cámaras de las estructuras ARJ, puede seguir extendiéndose para la atenuación de ondas de más largo periodo: las ondas de infragravedad responsables principales (ver *Capítulo II*) de los procesos de resonancia en puertos.

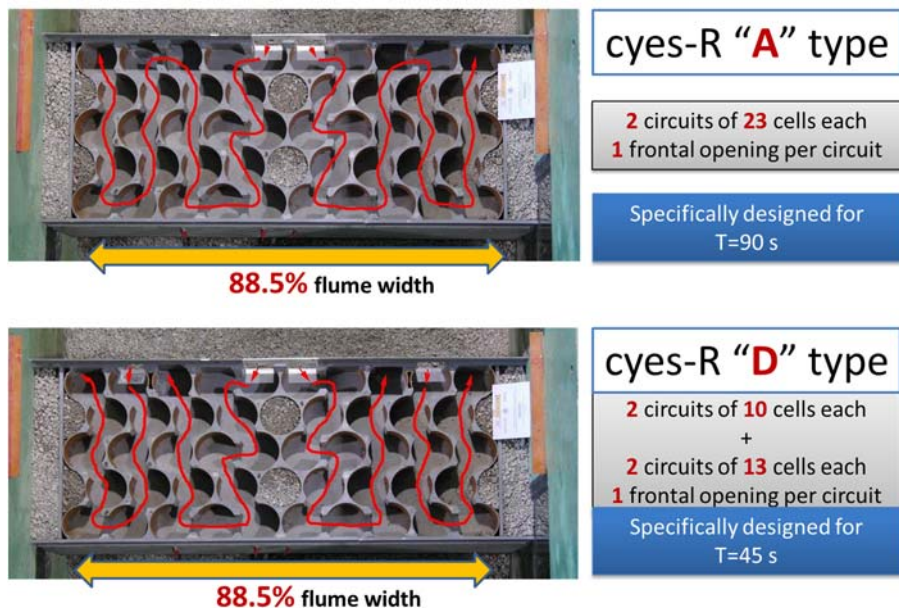


Figura III.52. Distintos tipos de circuitos en estructuras ARJ para la atenuación de ondas largas (González-Escrivá y Medina, 2012).

La respuesta en el dominio del tiempo típica de una estructura ARJ con circuitos disipativos largos para la atenuación de onda larga (ARJ-R) resonando con la frecuencia natural de la dársena al cesar la acción exterior se muestra en la *Fig. III.53* comparativamente con una estructura vertical reflejante. La atenuación producida por la estructura ARJ-R muestra una evidente reducción en el tiempo de la amplitud de las oscilaciones frente a la respuesta de la estructura vertical completamente reflejante que se emplea como referencia. Se aprecia una débil amortiguación en las oscilaciones incluso con la estructura completamente reflejante debido a la disipación interna en el seno del fluido y a la fricción en los contornos del canal de ensayos.

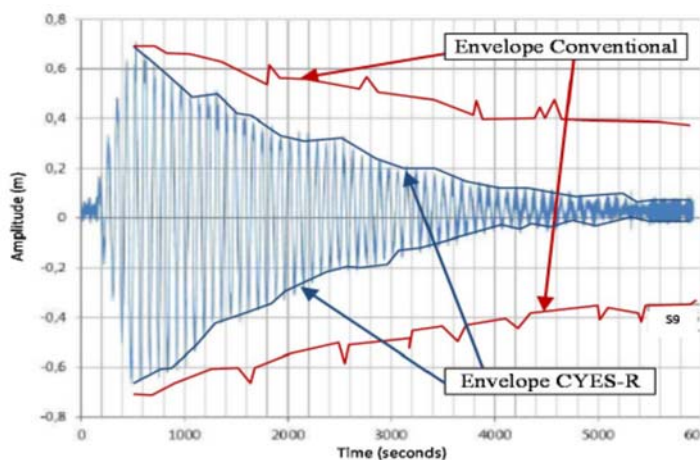


Figura III.53. Respuesta en el dominio del tiempo de una estructura ARJ con circuitos disipativos largos comparándola con la de una estructura vertical reflejante (González-Escrivá y Medina, 2012).

III.4. Estructuras antirreflejantes en España.

Ripoll et al, (2011) expone el estado de las estructuras ARJ en España hasta la fecha. Las autoridades portuarias implicadas y las obras/tramos correspondientes eran:

- AP Almería
 - Muelle de Poniente del Puerto de Almería
 - Muelle de Ribera I y II del Puerto de Carboneras
- AP Bahía de Algeciras
 - Dique de abrigo exterior de Isla Verde
- AP Bilbao
 - Muelle Sur del Puerto de Bilbao
- AP Santa Cruz de Tenerife
 - Muelle en la Dársena Este del Puerto de Sta. Cruz de Tenerife
- AP de Valencia
 - Muelle en la Dársena Exterior del Puerto de Valencia

Actualmente existen un dique y tres muelles que se han incorporado al inventario de estructuras ARJ:

- AP Castellón
 - Dique Modesto Vigueras del Puerto de Castellón
- AP A. Coruña
 - Muelle transversal Oeste del Puerto de Punta Langosteira
- AP Tenerife
 - Muelle antirreflejante en el puerto de Granadilla

- AP las Palmas
 - Muelle antirreflejante en el puerto del Rosario (en curso)

El procedimiento constructivo empleado habitualmente para la creación de las aberturas que definirán las cámaras incluye el corte con hilo o disco de diamante de las secciones armadas de hormigón de los cajones aligerados huecos con posibles efectos negativos sobre:

- la resistencia y durabilidad de las estructuras, requiriendo un mayor coste de inspección y mantenimiento a lo largo de su vida útil.
- el rendimiento en la ejecución, debido a que la técnica de corte constituye una tarea delicada que produce retrasos significativos.

La ejecución de las aberturas de las estructuras ARJ mediante técnicas no destructivas es aconsejable para evitar la problemática citada. Martínez et al (2010) refiere el proceso de ejecución de un cajón a escala 1:1 con éxito durante el desarrollo del proyecto MUCAR (2008-2010), incluyendo técnicas específicas en el deslizado empleando encofrados adaptados, paneles de cierre removibles que posibilitan la flotabilidad y remolque hasta su ubicación definitiva, creándose las cámaras al retirar dichos paneles o tapas. Los costes obtenidos representan un incremento del 10-15% respecto de un cajón convencional sin cámaras¹⁶².

III.5. Resumen y conclusiones del Capítulo III.

En el presente capítulo se han identificado, clasificado y analizado los principales mecanismos de disipación de energía que intervienen en la interacción onda-estructura, a partir de los cuales se ha llevado a cabo la taxonomía de las estructuras antirreflejantes en el interior de los puertos. Se ha descartado el planteamiento cronológico clásico, optándose un enfoque basado en los complejos mecanismos disipativos intervinientes y en la necesidad de evaluar la potencialidad en la atenuación de la energía para oleaje y onda larga.

Se ha analizado la idoneidad a la funcionalidad y menor afección a la operatividad portuaria de las estructuras antirreflejantes a ubicar en el interior de los puertos, destacando la dificultad en la atenuación de la onda larga y la habitual necesidad de ocupación de una superficie en planta generalmente excesiva en un espacio demandado y limitado como es el de las dársenas portuarias.

¹⁶² El "know-how", junto con un diseño optimizado de las estructuras ARJ tiene un efecto directo en la calidad de la ejecución y en los aspectos económicos.

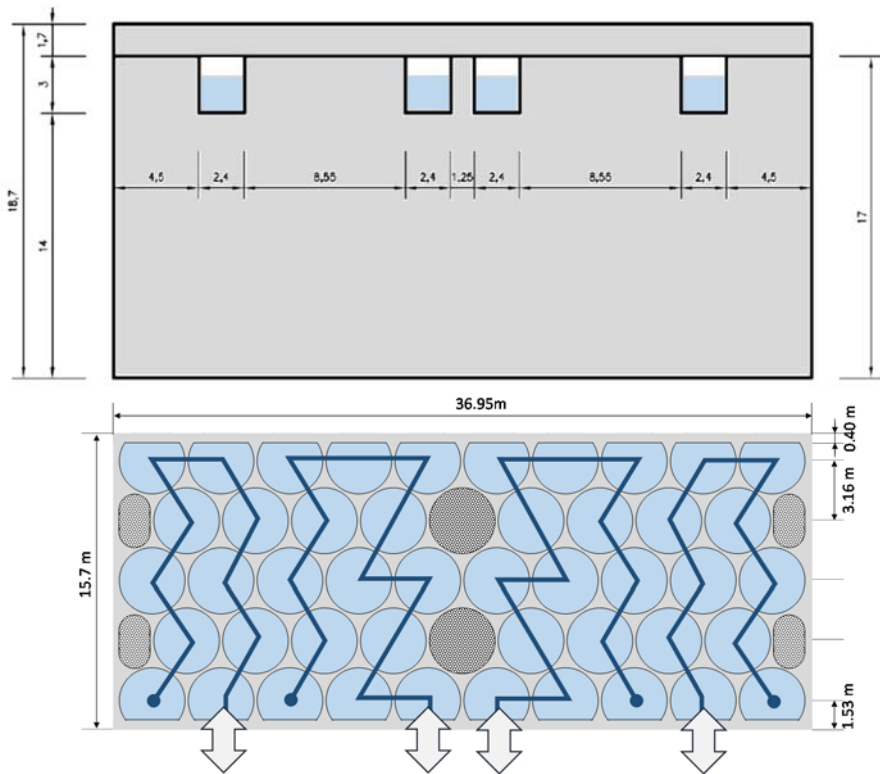
Recientemente, en las Jornadas Españolas de Ingeniería de Puertos y Costas, Torres et al. (2017) presentó la obra del Puerto de Granadilla (Tenerife) que incluía sistemas antirreflejantes ARJ destacando la importancia del proceso constructivo, así como la repercusiones que tienen este tipo de soluciones a la hora de construir. En su intervención indicó que el coste de ejecución de las unidades de obra del sistema ARJ puede ser del orden del 15%, pero la interrelación con otras actividades en el resto de la ejecución del dique o muelle tenía una repercusión bastante superior, probablemente relacionado con la solución y el desarrollo del procedimiento constructivo empleado.

Se destaca la incapacidad de las estructuras ARJ para la atenuación de oleajes de periodos asociados a temporal ($T[s]>15$) debido la limitación de la anchura que puede destinarse a las cámaras por razones de estabilidad global de la estructura. También, se subraya la sensibilidad en la eficiencia de las estructuras ARJ al periodo del oleaje para la activación de los mecanismos disipativos resonantes de estas estructuras. Para paliar esta problemática, pueden conectarse varias celdas interiores de los cajones en las estructuras ARJ para la configuración de circuitos disipativos largos, que canalizan el flujo en el interior de las cámaras en distintas direcciones. De esta forma se hace posible extender la eficiencia a periodos mayores que los que serían abarcados por la geometría disponible de la estructura ARJ.

Este planteamiento, unido a la difícil adaptabilidad práctica y eficiente de las soluciones antirreflejantes existentes para la atenuación de onda larga, canalizan el estudio a la extensión del concepto de circuitos para el diseño de estructuras ARJ a *demanda* para la atenuación de onda larga que será objeto del próximo capítulo.

CAPÍTULO IV

Estructuras marítimas ARJ de circuitos disipativos argos (ARJ-R)



Estructura ARJ-R con 4 circuitos de celdas circulares.

Los muelles convencionales son estructuras marítimas para el atraque de buques que ofrecen un paramento vertical muy reflejante al oleaje y otras oscilaciones del agua en la dársena o área de flotación en la que se encuentran. Para atenuar la reflexión del oleaje y la energía dentro de las dársenas próximas es habitual la incorporación de elementos constructivos para reducir la reflectividad, como taludes protegidos con escollera, playas y muelles claraboya que reducen la agitación en las áreas de flotación.

Por otra parte, existe la posibilidad de reducir la reflectividad de los muelles y estructuras marítimas con frente vertical mediante modificaciones estructurales que provoquen la disipación de la energía del oleaje. La mayoría de este tipo de soluciones antirreflejantes existentes se basan en la tipología ARJ (Jarlan, 1961), consistente en una cámara perforada que disipa, la energía del oleaje por desfase del oleaje reflejado respecto del oleaje incidente entre la pared frontal permeable y la posterior impermeable. Se produce la atenuación de la reflexión en las estructuras ARJ debido a la disipación de energía por turbulencia y fricción generada en las paredes perforadas y por disipación de energía mediante el proceso de superposición de trenes de oleaje incidentes y reflejados con diferente sentido de propagación y fase.

Típicamente, las paredes de las estructuras ARJ tienen ventanas, 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 en la cámara, siendo mínimo el coeficiente de reflexión para valores del ancho relativo $B/L=0.2$. La mayor efectividad se obtiene con estructuras ARJ multicámara (dos y tres cámaras) para un mayor rango de periodos, y con paredes ranuradas frente a las perforadas con orificios.

Sin embargo, las soluciones antirreflejantes ARJ existentes para muelles presentan el inconveniente de su escasa eficacia para reducir la reflexión del oleaje de baja frecuencia¹⁶³. 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 periodo de la onda incidente, no hay interferencia relevante entre reflexiones y la eficacia antirreflejante es baja. En otras palabras, si la anchura de la zona antirreflejante del dique o muelle es

¹⁶³Otras soluciones expuestas en el *Capítulo III* son menos adecuadas para la conformación de un muelle que las tipologías ARJ, por su dificultad de adaptación a las necesidades funcionales, su mayor complejidad constructiva, y algunas de ellas menos robustas estructuralmente. Además, la viabilidad constructiva y económica de las estructuras ARJ fue verificada en prototipo a escala real (Martínez et al, 2010) en el proyecto de I+D+I "Diseño y adaptabilidad de cajoneros convencionales para la construcción de diques y muelles antirreflejantes", CADIMA (2009-2011), financiado por los Ministerios de Fomento y de Ciencia e Innovación en el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011, en el que participaron la *Universitat Politècnica de València*, la constructora *CYES* y la consultora *Iberport*.

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 periodos 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 periodos de más de 30 segundos asociados a 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 el presente capítulo, se define el concepto de circuito que permite dar solución al problema técnico planteado, exponiéndose distintos diseños de estructuras ARJ, adecuadas para la atenuación de la reflexión del oleaje, que puedan ser eficaces para bajas frecuencias y puedan adaptarse fácilmente a las condiciones particulares de cada dársena o tramo de muelle. La concreción del diseño para estructuras ARJ, eficaces para la atenuación de las ondas largas existentes en los procesos de resonancia en los puertos, se llevara a cabo con estructuras ARJ de circuitos disipativos largos efectuándose los correspondientes diseños preliminares en el presente capítulo para cajones de celdas circulares y cuadradas, que serán analizados experimentalmente en un capítulo posterior.

IV.1. Estructura marítima vertical con cámaras de unidades múltiples para la atenuación de la reflexión del oleaje (EP2504496B1)

Para poder atenuar el oleaje y las ondas de baja frecuencia en estructuras marítimas verticales con las anchuras y métodos constructivos habituales, se incorporan diferentes cámaras de disipación con lo que se persigue la implementación de los efectos técnicos de las estructuras ARJ. Sin embargo, a diferencia de los sistemas clásicos, 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 disipativa frente a las frecuencias más bajas¹⁶⁴.

¹⁶⁴Idea fundamental de la patente europea EP2504496B1 (Medina et al, 2016), recientemente concedida.

IV.1.1. Definiciones. Concepto de circuito disipativo o antirreflejante.

La definición del concepto de circuito requiere definir la terminología que se utilizará posteriormente en la descripción de las estructuras ARJ de circuitos (se incluye entre paréntesis la numeración con que se indicará la posición en las figuras):

- *Unidad (1, 2)*: se entiende por unidad el bloque hueco en el caso de muelle de bloques y la celda en el dique o muelle de cajones de celdas. Las unidades pueden ser celdas cuadradas, rectangulares o circulares¹⁶⁵, o bloques, cuadrados o rectangulares.
- *Aberturas (4, 5)*: ventanas (10), ranuras (11) u orificios (12) responsables de la permeabilidad tanto en el panel frontal como en el interior de la estructura.
- *Cámara de disipación (6)*: espacio interior a la estructura ARJ de circuitos disipativos conectado con el exterior mediante aberturas en el paramento frontal y formada por un conjunto de unidades interconectadas a través de aberturas intermedias entre celdas adyacentes, siendo las paredes laterales y posteriores de la cámara de disipación, impermeables.

La formación de cámaras de disipación con circuitos de unidades múltiples en cajones lleva implícito el aislamiento horizontal de unos circuitos respecto de otros. Las celdas de los cajones están aisladas y sólo se abren o conectan las celdas correspondientes del circuito de que forman parte. 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 reducida la longitud efectiva del circuito.

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.

- *Dirección de circulación*: Para el caso de que la estructura se forme con unidades - celdas o bloques - cuadradas, las direcciones de circulación se definen 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

¹⁶⁵Las 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 las cuadradas o circulares.

con unidades circulares, las direcciones de circulación se definen 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.

- *Paramento frontal (3)*: superficie delantera de la estructura vertical en la que incide el oleaje.
- *Lateral*: 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.
- *Posterior*: 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.
- *Zona antirreflejante*: 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.
- *Anchura de la zona antirreflejante (9)*: máxima distancia en dirección perpendicular al paramento frontal entre dicho paramento y el punto más separado de la zona antirreflejante respecto a aquél.

Se define como *circuito* (González-Escrivá, 2011; Medina et al, 2016), 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.

La importancia en la definición de circuito reside en la posibilidad de disponer de circuitos de unidades múltiples de mayor o menor longitud, sin variar la anchura de zona antirreflejante, pero pudiendo tener mayor longitud que ésta. La longitud del circuito¹⁶⁶ permite adaptar el diseño a las condiciones locales del oleaje y a las ondas largas que inciden sobre la estructura pudiendo obtenerse diseños óptimos específicos, adaptados a las condiciones locales de cada tramo de obra.

Específicamente para la atenuación de la resonancia en puertos, el concepto de circuitos permite extender los mecanismos de disipación de las estructuras ARJ a las ondas largas mediante circuitos disipativos o antirreflejantes de unidades múltiples de gran longitud en muelles; 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.

¹⁶⁶Y por lo tanto de la cámara de disipación.

IV.1.2. Estructura ARJ de circuitos.

El concepto de circuito antirreflejante permite adaptar la respuesta de los muelles mediante la configuración de una amplia variedad de circuitos antirreflejantes que se pueden formar y pueden ser aplicados para optimizar diferentes tramos de muelle en una dársena con diferentes condiciones de oleaje incidentes. A diferencia de los muelles antirreflejantes convencionales, un tramo de muelle ARJ con circuitos disipativos antirreflejantes puede ser especialmente eficaz en la atenuación de reflexiones del oleaje de grandes temporales que entran en la dársena (periodos grandes) y otro tramo de muelle más abrigado puede ser eficaz frente a la atenuación de ondas de infragravedad, disponiendo circuitos antirreflejantes más largos.

Típicamente, la estructura ARJ de circuitos dispone de una zona antirreflejante que incorpora una o varias cámaras de disipación aisladas entre sí, abiertas por una o varias aberturas del paramento frontal de la estructura. 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 (ver *Figs. IV.1 y IV.2*). La eficacia antirreflejante depende de las porosidades de las pantallas exteriores e interiores, así como de la longitud y calado de los circuitos.

Constituye además una solución factible desde el punto de vista constructivo, a la vez que económicamente viable (Martínez et al, 2010). 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 desee 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.

Con generalidad, pueden definirse dos tipos de estructuras verticales ARJ de circuitos disipativos: a) estructuras verticales de cajones para diques o muelles a más de 10 metros de profundidad (ver *Figs. IV.1 y IV.2*) y b) estructuras verticales de bloques para muelles construidos en dársenas a menos de 18 metros de profundidad (ver *Fig. IV.3*).

En el caso de las estructuras de cajones (ver *Figs. IV.1 y IV.2*), 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.

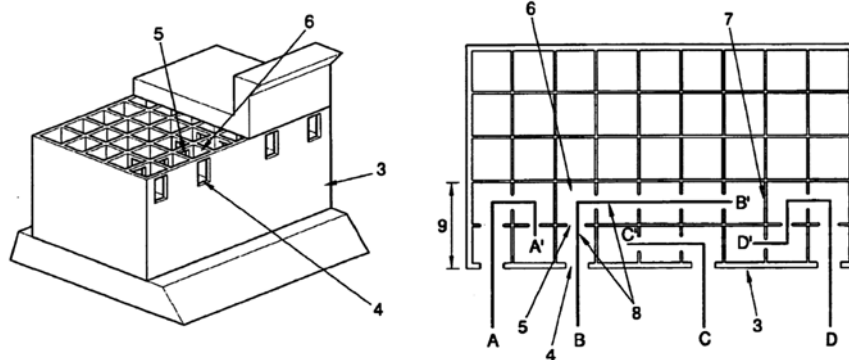


Figura IV.1. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por celdas de un cajón, con una zona antirreflejante de 2 celdas de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de diversas longitudes: 6 unidades (B-B'), 5 unidades (D-D'), 4 unidades (A-A') y 3 unidades (C-C'), que permite reducir la reflexión de ondas de un amplio rango de periodos (Medina et al, 2016).

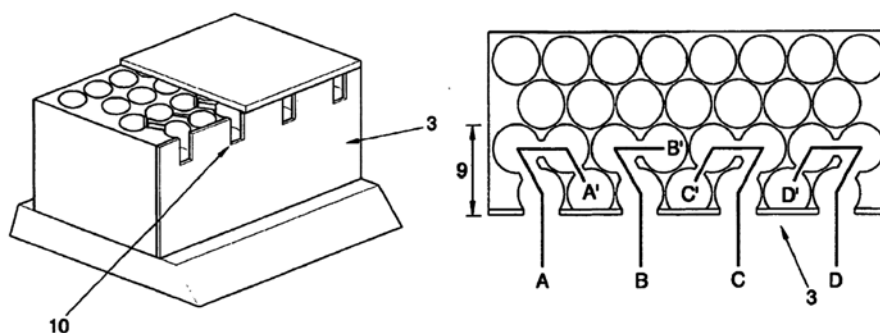


Figura IV.2. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades circulares formadas por celdas de una cajón con una zona antirreflejante de 2 unidades de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de diversas longitudes: 4 unidades (A-A', C-C' y D-D') y 3 unidades (B- B'), que permite reducir la reflexión de ondas de un amplio rango de periodos (Medina et al, 2016).

En el caso de muelles de bloques (ver Fig. IV.3), 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 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.

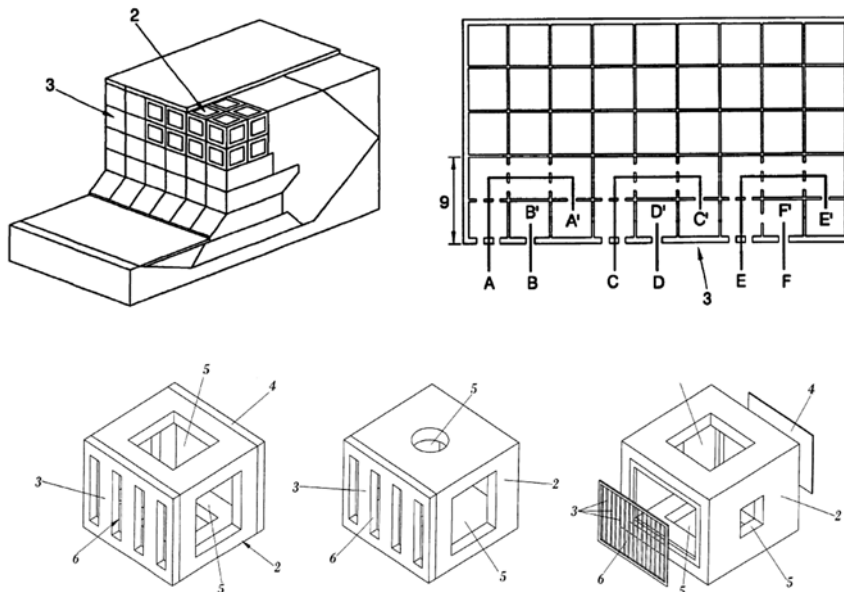


FIG. 4

Figura IV.3. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por bloques modulares ARPA (Garrido et al, 2009), 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'), que permite reducir la reflexión tanto de ondas de periodos altos como también bajos, pero menos eficiente en los periodos intermedios¹⁶⁷ (Medina et al, 2010).

Puede decirse que la efectividad antirreflejante de la estructura ARJ de circuitos disipativos depende de la de cada circuito de unidades múltiples y de la porosidad del paramento frontal de la estructura. La efectividad de cada circuito depende fundamentalmente de tres factores: (a) 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.

A diferencia de los sistemas antirreflejantes convencionales con cámaras de disipación de una o dos unidades, en los que la permeabilidad óptima del paramento frontal e intermedio se sitúa alrededor del 30% e influye de manera determinante en

¹⁶⁷Como las de oleaje de temporal y ondas de acompañamiento de buques y embarcaciones, sin ser efectivo para los oleajes intermedios.

la reducción de la reflexión, en las estructuras ARJ de circuitos disipativos, 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 la longitud de los circuitos¹⁶⁸ o por razones constructivas. Las dos reglas generales para establecer las permeabilidades dentro de cada circuito son:

- las permeabilidades de entrada a cada unidad deben mantenerse o decrecer desde el paramento exterior hacia el interior.
- las permeabilidades medias deberán ser 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 = $20\% + 10\% [N^{1/2} + d/d_c]^{1/4}$, donde N es la longitud de la cámara de disipación medida en número de unidades del circuito y d/d_c 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 disipación¹⁶⁹ (Medina et al, 2016).

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 (ver Fig. IV.4).

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 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 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

¹⁶⁸Si el número de circuitos que completan la zona antirreflejante son N , entonces existirán un número de aberturas entre N y $2N$, dependiendo de que cada circuito tenga una o dos aberturas al exterior. La porosidad dependerá del número de aberturas y del tamaño de las aberturas respecto de la superficie total del paramento frontal.

¹⁶⁹Así por ejemplo, si la profundidad de la cámara de disipación es un quinto de la profundidad de la dársena, $d/d_c = 5$ y si la cámara de disipación está compuesta por un 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 p_1 y $p_2 = 70\%$ para la entrada a la unidad frontal y la unidad contigua, p_3 y $p_4 = 60\%$ para las entradas de la tercera y cuarta unidad del circuito, y p_5 y $p_6 = 50\%$ para la entrada a la quinta unidad y la entrada a la unidad posterior. Si la cámara de disipación no tiene 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.

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 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.

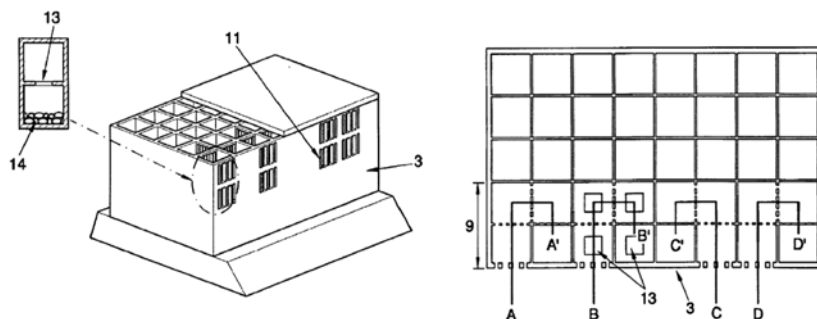


Figura IV.4. Estructura ARJ de circuitos disipativos de unidades cuadradas formadas por bloques, con una zona antirreflejante de 2 unidades de anchura y donde se han formado circuitos de unidades múltiples de la misma longitud: 4 unidades (A-A', B-B', C-C' y D-D'). Las celdas que forman el circuito BB' cuentan además con elementos que incrementan la rugosidad en el lecho de la cámara de disipación, aumentando las pérdidas de la energía del oleaje por fricción (Medina et al, 2010).

IV.2. Estructura ARJ de circuitos disipativos largos para atenuación de la resonancia (ARJ-R)

El concepto de circuito puede aplicarse al diseño de estructuras ARJ que sean eficientes para varias situaciones de oleaje y otras oscilaciones del mar, mediante la definición de circuitos de diferentes longitudes en una zona antirreflejante de menor anchura que la estructura ARJ. En este apartado, el concepto de circuito se aplicará exclusivamente a estructuras ARJ de circuitos disipativos largos, en adelante ARJ-R, con el objeto de atenuar las ondas de baja frecuencia responsables de los fenómenos de resonancia en los puertos. En este caso, aunque el paramento frontal de la estructura vertical resultaría impermeable y reflejante 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 baja frecuencia.

Las estructuras ARJ-R consideradas en la presente investigación tienen las siguientes condicionantes particulares¹⁷⁰:

- La estructura se desarrolla a partir de modificaciones de cajones prefabricados de hormigón armado con celdas interiores aligeradas, de dimensiones exteriores 36.95 x 15.70 x 17.0 (eslora[m] x manga[m] x puntal[m]) con celdas (ver Fig. IV.5):
 - * circulares de 3.5 m de diámetro interior,
 - * o cuadradas de 2 m medido interiormente entre paramentos¹⁷¹.

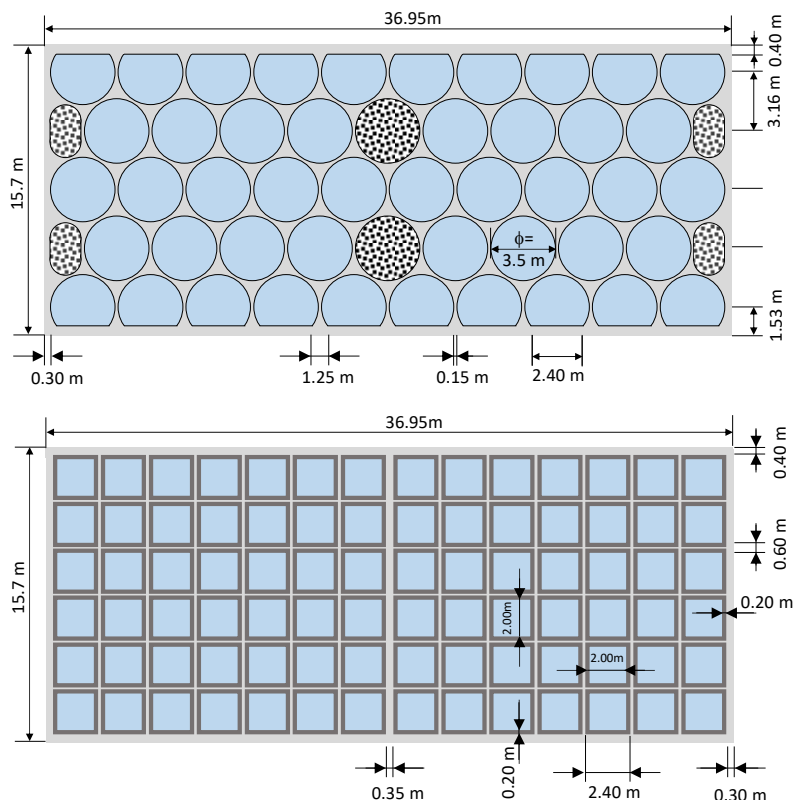


Figura IV.5. Planta de los cajones base para las ARJ-R considerados en la presente investigación.

¹⁷⁰El concepto de circuito y la experimentación de las estructuras ARJ de circuitos disipativos largos se desarrolló en el marco del proyecto de I+D+I CADIMA con las empresas cyes e Iberport, por lo que las dimensiones de los cajones corresponden con las del cajón estándar de celdas circulares de cyes con aplicación de referencia en el Mediterráneo.

¹⁷¹En realidad el diseño no se basa en un cajón de celdas cuadradas, sino en el cajón de celdas circulares de cyes que en la parte superior se modifica la estructura para incorporar circuitos rectangulares de 2 m de ancho. En el texto se muestran como cajones de celdas cuadradas por dotar de mayor generalidad a la exposición.

- Las aberturas tanto en el paramento frontal como las interiores entre celdas serán del tipo ventana¹⁷², de dimensiones:
 - * La altura de la ventana se define a partir de condiciones para el Mediterráneo¹⁷³, con un mínimo que se corresponde con el valor de la suma de la carrera de marea y de la altura del oleaje u oscilación que pueda incidir sobre la estructura, de valor 3 m, con profundidad en la cámara de 2 m (ver Fig. 6).

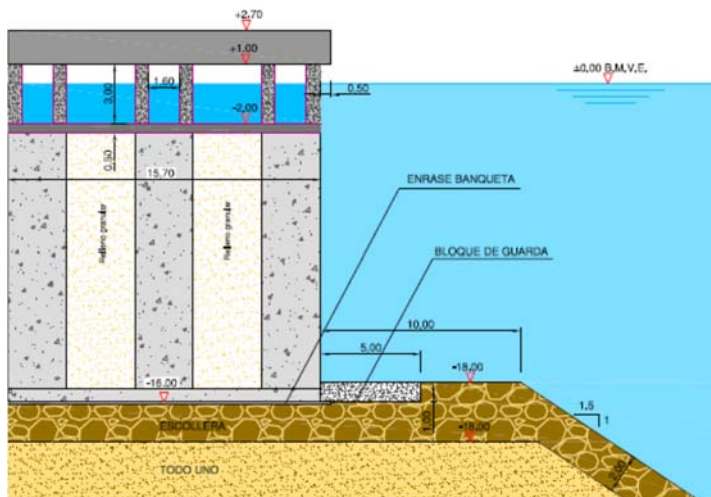


Figura IV.6. Sección de la estructura ARJ-R en la presente investigación.

- * El ancho de ventana se define para que en el caso de celdas circulares de 3.5. m de diámetro, el cajón continúe siendo resistente estructuralmente incluso en el caso en que se practiquen aberturas en celdas consecutivas en el panel frontal, de valor 2.4 m. Se adopta idéntico valor para el cajón de celdas cuadradas con fin a la mayor similitud que permita la comparación entre estructuras ARJ-R obtenidas a partir de cualquiera de los dos cajones.
- La sección de la estructura ARJ-R se define considerando su utilización en un puerto con calado de 20 m, como en los grandes puertos del Mediterráneo (ver Fig. IV.6)

¹⁷²Por continuidad con los diseños de estructuras ARJ para diques y muelles investigados experimentalmente en los proyectos de investigación MUCAR (2008-2010) y CADIMA (2008-1011), manteniendo las dimensiones utilizadas para las aberturas en la aplicación para el Mediterráneo. Asimismo, las estructuras ARJ de circuitos disipativos largos contarán con pocas aberturas en el panel frontal, por lo que la permeabilidad deberá ser elevada para incrementar su eficiencia.

¹⁷³Las variaciones de nivel del mar habituales en el Mediterráneo para el diseño de obras marítimas es de 0.8-1 m.

Específicamente, para la atenuación de la onda de infragravedad, los circuitos deberán tener una longitud entre 0.1 y 0.2 veces la longitud de onda en la cámara, L_c (siendo la profundidad en la cámara, $d_c=2m$) para periodos de oscilación correspondientes a la banda de infragravedad (30s-300s), lo que implica que los circuitos tengan una longitud entre 13m y 266 m. La eficiencia de los cajones descritos puede cuantificarse apriorísticamente en función de: 1) la longitud de los circuitos¹⁷⁴, B'_{cir} y 2) el número de circuitos¹⁷⁵, N (ver *Tabla IV.1*).

Tabla IV.1. Estimación de la eficiencia de las estructuras ARJ-R

$T[s]$	$d_c[m]$	$L_c[m]$	Estimación B_{cir} (*)		celdas circulares		celdas cuadradas	
			0.1· $L_c[m]$	0.2· $L_c[m]$	B_{cir}	N	B_{cir}	N
30	2	132.69	13	27	20	8	14	14
45	2	199.19	20	40	23	7	29	7
60	2	265.67	27	53	27	6	34	6
90	2	398.58	40	80	32	5	40	5
105	2	465.04	47	93	40	4	50	4
135	2	597.93	60	120	54	3	67	3
200	2	885.86	89	177	81	2	101	2
300	2	1328.81	133	266	161	1	202	1

(*) Medina et al, 2010

La necesidad de experimentación física a escala reducida¹⁷⁶, en condiciones de resonancia, obliga a tener en consideración las dimensiones del canal de ensayos para el diseño de las estructuras ARJ-R a ensayar¹⁷⁷. A partir de la experiencia en la experimentación física asociada a estructuras ARJ en diferentes proyectos de investigación¹⁷⁸ se estima que las condiciones resonantes que pueden ser más

¹⁷⁴La longitud de los circuitos se ha estimado a partir de la geometría. En el caso del cajón de celdas circulares, las 46 celdas se han supuesto distribuibles en un máximo de 8 circuitos disipativos largos con 5.75 celdas de media por circuito. La longitud de circuito por celda se supone igual del diámetro de la misma, $B'_{cel}=3.5 m$. Para el caso del cajón de celdas rectangulares, la estimación de la longitud se lleva a cabo suponiendo que pueden definirse 14 circuitos disipativos largos de 6 celdas cuadradas por circuito. La longitud de circuito por celda se supone igual a las dimensiones del cuadrado interior entre paramentos incrementada en el espesor de las paredes entre celdas, promediado en un circuito de 6 celdas, $B^{CU}_{cel}=(2.0+0.4) m$

¹⁷⁵Relacionado con el número de aberturas y por lo tanto con la porosidad del paramento frontal.

¹⁷⁶Como se ha expuesto anteriormente, la interferencia destructiva entre ondas y el vertido es el proceso principal de atenuación de energía y el rozamiento del flujo a su paso por las perforaciones de la pared y dentro de la cámara constituyen un proceso disipativo de segundo orden. 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, los cambios de dirección del flujo, así como las turbulencias propias de éste. Todo ello, unido a las numerosas variables que intervienen en el proceso, tanto geométricas como características de las ondas incidentes, hace muy complejo el estudio del comportamiento del flujo en esta tipología de estructuras marítimas requiriendo la experimentación física para la cuantificación de la eficiencia de las estructuras ARJ-R.

¹⁷⁷Como se ha expuesto en el *Capítulo 2*, las oscilaciones resonantes son función de la geometría de la dársena. Para la experimentación física el sistema dársena-canal de ensayos será el que controlará las oscilaciones resonantes que se produzcan.

¹⁷⁸El autor ha participado activamente en los siguientes proyectos de investigación, relacionados con los fenómenos de reflexión y disipación de energía de oleaje en estructuras ARJ:

- * "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.

fácilmente reproducibles en laboratorio a las escalas habituales son las asociadas a los periodos de oscilación comprendidos entre 80s y 100 s.

A partir de los valores estimados en la *Tabla IV.1*, descartando las combinaciones de circuitos que no sean simétricas¹⁷⁹, las combinaciones de circuitos eficientes “a priori”, desde un punto de vista teórico¹⁸⁰, para la atenuación de oscilaciones resonantes para el modo fundamental y el secundario en el rango especificado son:

Tabla IV.2. Estimación de la eficiencia de las estructuras ARJ-R

ARJ-R de celdas circulares

B_{cir}	N	$max T[s]$	$min T[s]$	$max L_c[m]$	$min L_c[m]$
(27)	(6)	61	30	270	135
40	4	90	45	400	200
81	2	183	91	810	405

ARJ-R de celdas cuadradas

B_{cir}	N	$max T[s]$	$min T[s]$	$max L_c[m]$	$min L_c[m]$
34	6	77	38	340	170
50	4	113	56	500	250
(101)	(2)	228	114	1010	505

Para complementar los casos para el modo fundamental se incluyen combinaciones de 6 circuitos para la estructura ARJ-R de celdas circulares y la de 2 circuitos para la estructura ARJ-R, con rangos de periodos asociados al modo fundamental de oscilación, inferior y superior al objetivo, respectivamente.

La definición de conjuntos de 2, 4 y 6 circuitos simétricos similares a los obtenidos teóricamente, pero adaptados a la geometría particular de los cajones de celdas circulares y cuadradas empleados como base, se concreta en las características expuestas en la *Tabla IV.3*. Las estructuras ARJ-R así obtenidas, con los criterios expuestos, a partir de los cajones de celdas circulares y cuadradas descritos anteriormente quedan definidas mediante:

- * la sección expuesta en la *Fig. IV.6*, y
- * los esquemas en planta de los circuitos y la disposición de aberturas en alzado frontal representadas en las *Figs. IV.7 a IV-12*.

¹⁷⁷ (continuación)

- * “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.

¹⁷⁹El posible efecto en la necesaria experimentación física serían las ondas transversales, que dificultarían la interpretación y análisis del fenómeno a modelizar.

¹⁸⁰La particular geometría de los cajones y la organización de los circuitos en los mismos motivará que las distribuciones finales sean distintas de las indicadas.

Tabla IV.3. Características de la distribución de circuitos en las estructuras ARJ-R

ARJ-R de celdas circulares

n	B_{cir}	N	$max T[s]$	$min T[s]$	$max L_c[m]$	$min L_c[m]$	nombre
23	(81)	2	182	91	805	403	ARJ-R-CI-1
10	35	2	91	45	403	201	ARJ-R-CI-2
13	46	2					
10	35	2	51	26	228	114	ARJ-R-CI-3
6.5	23	4					

ARJ-R de celdas cuadradas

n	B_{cir}	N	$max T[s]$	$min T[s]$	$max L_c[m]$	$min L_c[m]$	nombre
42	(101)	2	228	114	1008	504	ARJ-R-CU-1
18	43	2	114	57	504	252	ARJ-R-CU-2
24	58	2					
18	43	2	65	33	288	144	ARJ-R-CU-3
12	29	4					

Debe tenerse en cuenta que la longitud del circuito para una eficiencia óptima está asociada al tiempo en el que la onda recorre la extensión del circuito y vuelve al paramento frontal para interferir destructivamente con la onda incidente. Ese recorrido será efectivo si la propagación de la onda tiene lugar en todo el circuito. Sin embargo, los cambios de dirección en el interior del circuito así como la fricción, principalmente, producen pérdidas de energía que pueden reducir la distancia recorrida por el flujo en su propagación por el circuito, con lo que el circuito sólo actuará hasta esa longitud efectiva, Be_c . Por lo tanto, los valores obtenidos son estimaciones teóricas que deberán verificarse experimentalmente para las estructuras ARJ-R, para comprobar se es necesario efectuar correcciones para optimizar la longitud de los circuitos a las longitudes efectivas desarrolladas. Dicha verificación experimental a escala reducida formará parte del siguiente capítulo.

Pueden añadirse a los circuitos así creados, elementos que incorporen rugosidad con provocando mayores pérdidas de energía modificando así la longitud efectiva¹⁸¹ Be_c .

En la Fig. IV.7 se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas circulares con 46 celdas huecas en el que se han creado dos circuitos simples de 23 celdas cada uno, conectados con el exterior con una doble ventana centrada. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/L_c \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CI-1 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 90 s.

¹⁸¹En el Capítulo V se incorporarán elementos para incrementar la pérdida de energía en los circuitos de una de las tipologías ARJ-R-CU para evaluar su efecto.

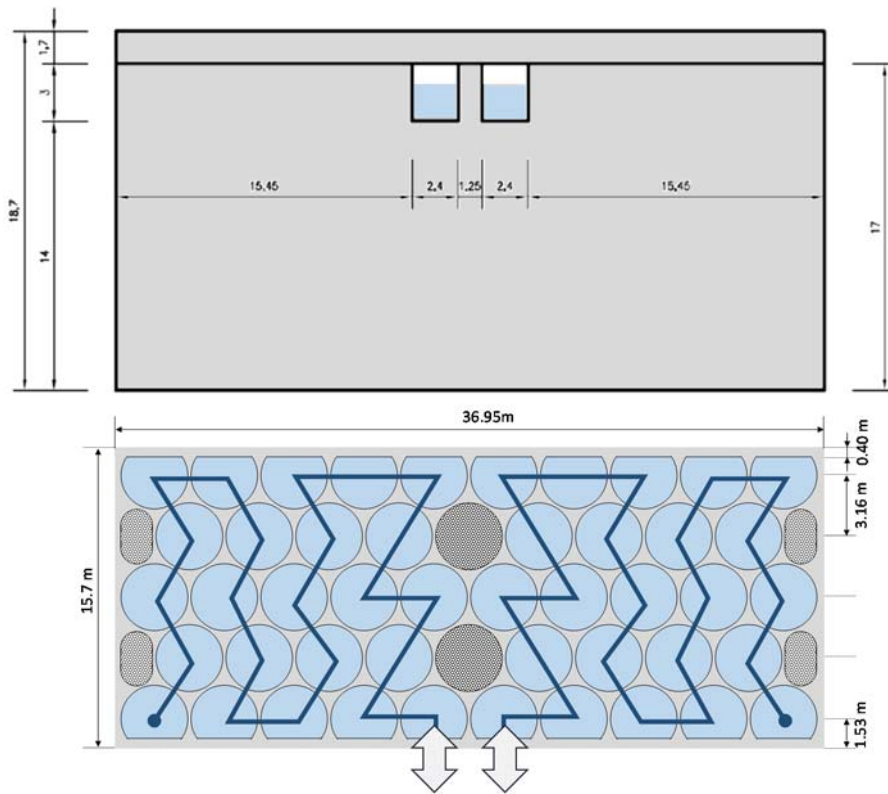


Figura IV.7. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-1.

En la Fig. IV.8 se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas circulares con 46 celdas huecas en el que se han creado dos circuitos simples de 10 celdas y dos de 13 cada uno, conectados con el exterior con una doble ventana centrada y dos ventanas simples laterales. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/Lc \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CI-2 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 45 s.

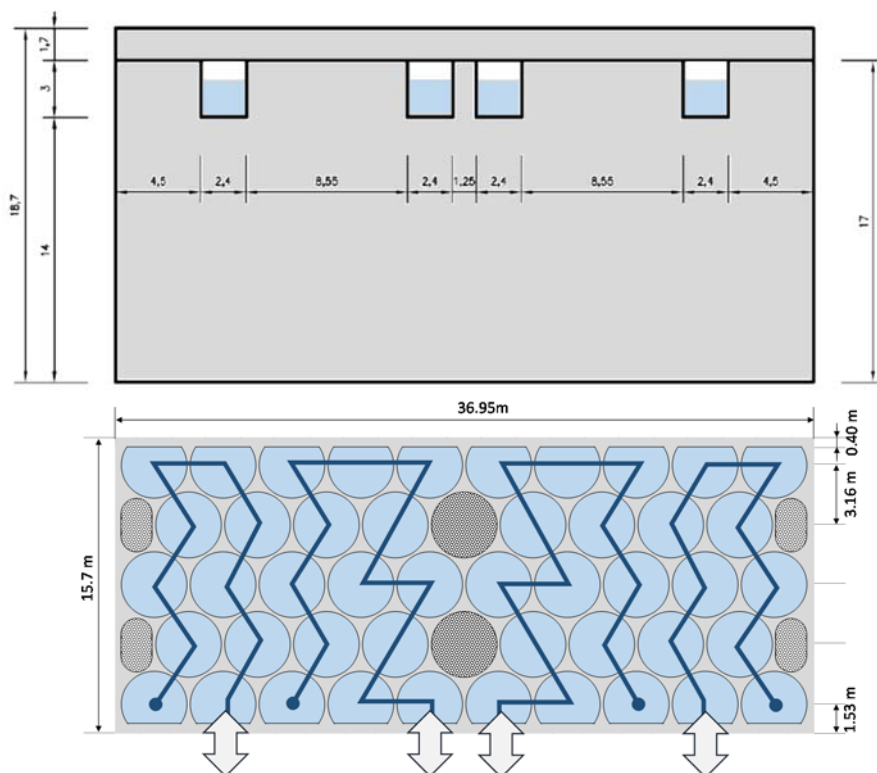


Figura IV.8. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-2.

En la Fig. IV.9 se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas circulares con 46 celdas huecas en el que se han creado dos circuitos simples y dos circuitos dobles, dos de 10 celdas y cuatro de 13/2 celdas, cada uno conectados con el exterior con una doble ventana centrada y dobles ventanas laterales. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/Lc \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CI-3 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 25 s.

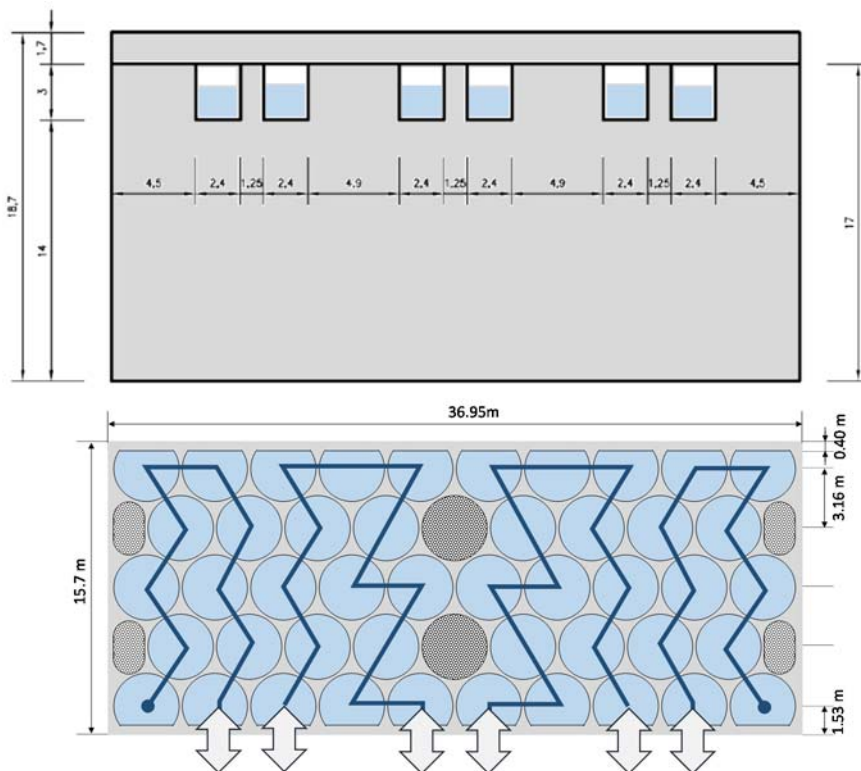


Figura IV.9. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-3.

En la *Fig. IV.10* se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas cuadradas con 84 celdas huecas en el que se han creado dos circuitos simples de 42 celdas cada uno, conectados con el exterior con una doble ventana centrada. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/Lc \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CU-1 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 114 s.

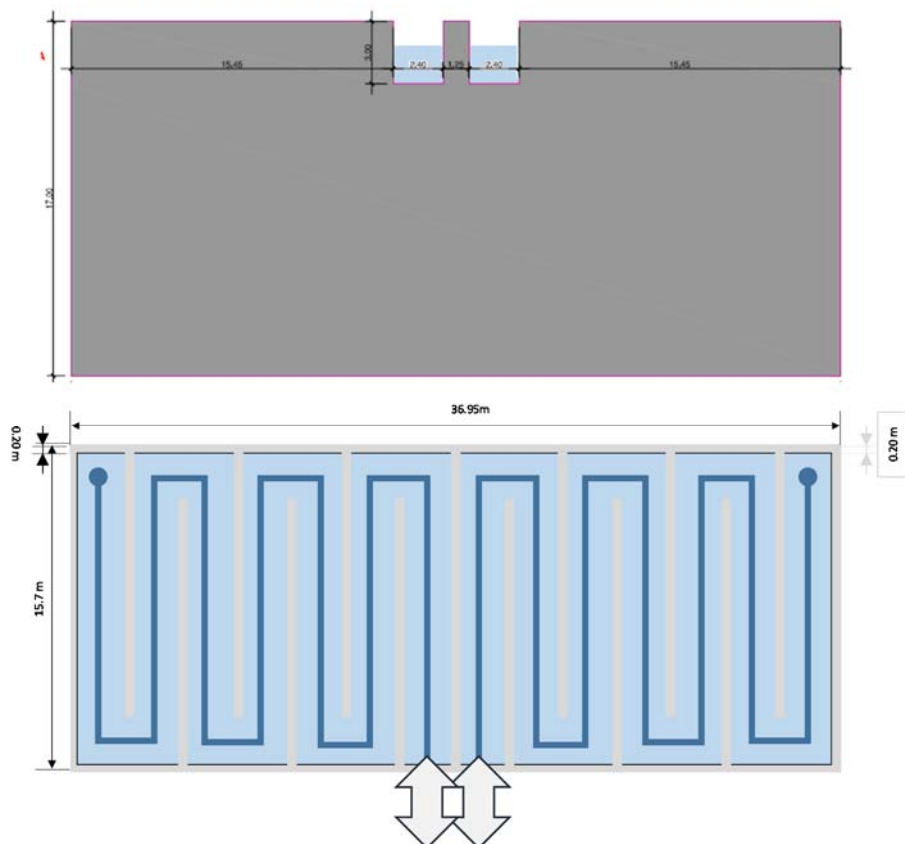


Figura IV.10. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-1.

En la Fig. IV.11 se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas cuadradas con 84 celdas huecas en el que se han creado dos circuitos simples de 18 celdas y dos de 24 cada uno, conectados con el exterior con una doble ventana centrada y dos ventanas simples laterales. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/Lc \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CU-2 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 57 s.

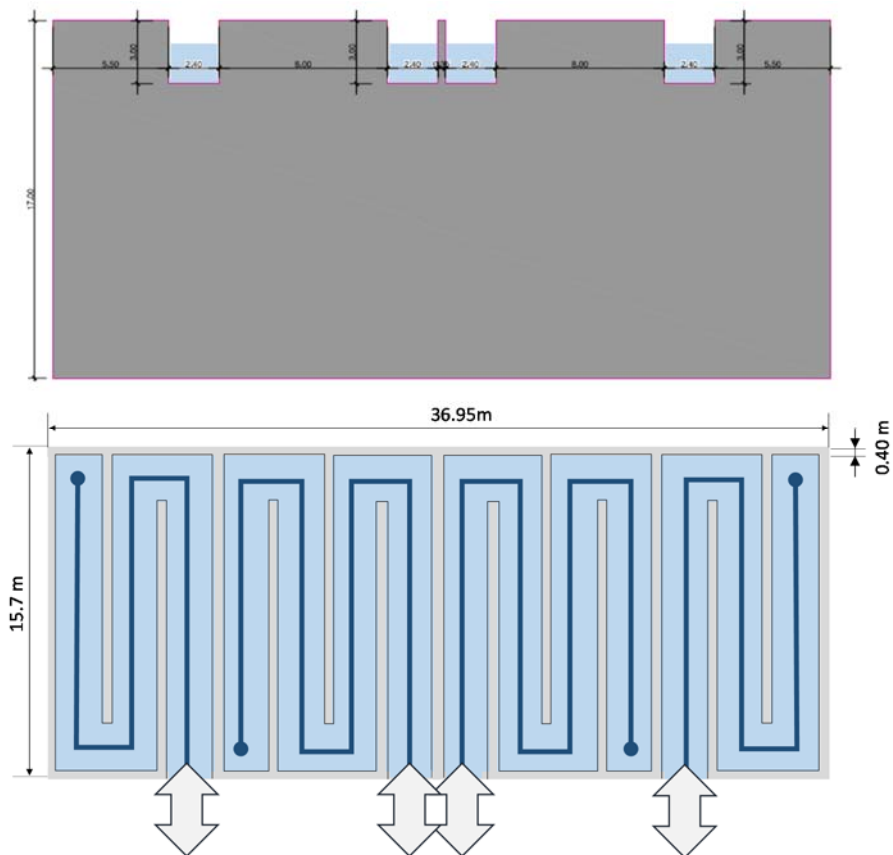


Figura IV.11. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-2.

En la Fig. IV.12 se representa el diseño del cajón para estructura ARJ-R efectuado sobre el cajón de celdas cuadradas con 84 celdas huecas en el que se han creado seis circuitos simples, cuatro de 12 celdas y dos de 18 celdas, cada uno conectados con el exterior con una doble ventana centrada y dobles ventanas laterales. Si se cumpliera la relación propuesta para la optimización de cajones antirreflejantes convencionales $B/Lc \approx 0.2$, la tipología ARJ-R-CU-3 debería ser adecuada para ondas de periodos en el entorno de los 33 s.

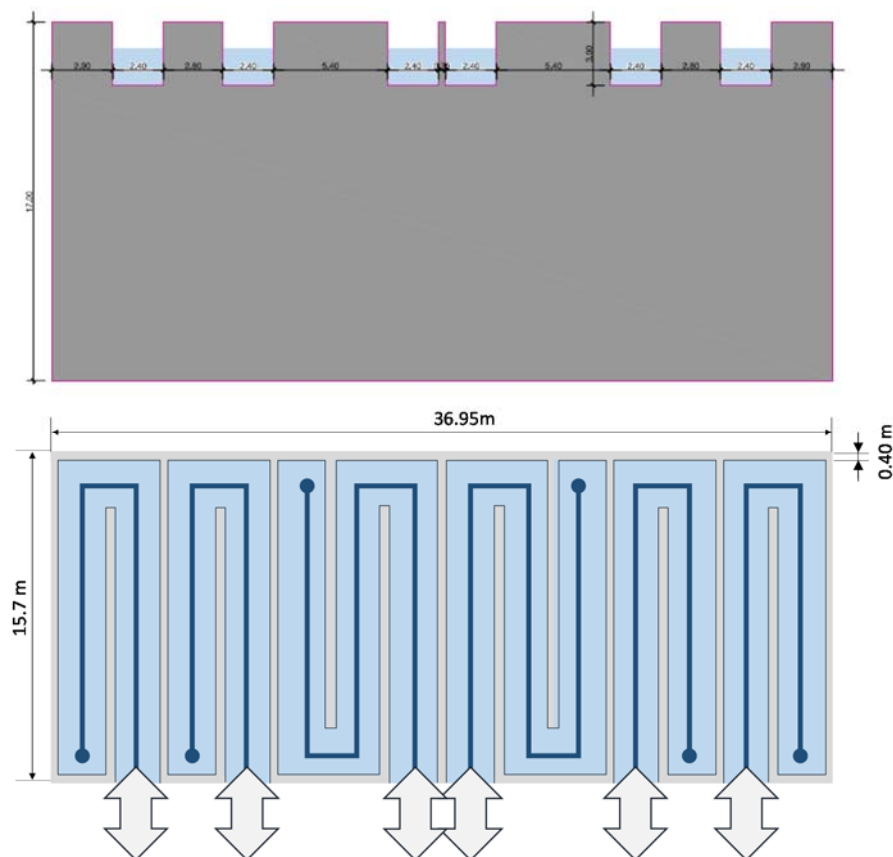


Figura IV.12. Planta y alzado del cajón correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-3.

IV.3. Resumen y conclusiones del Capítulo IV

Se han expuesto las bases para la extensión de la efectividad del mecanismo de atenuación de oleaje descrito en el *Capítulo 3*, para la tipología antirreflejante Jarlan, ARJ, a ondas de infragravedad, sin incrementar las dimensiones habituales de los cajones convencionales empleados en la construcción de estructuras marítimas verticales. Las estructuras ARJ así modificadas se han planteado como las más adecuadas para la incorporación directa a estructuras para muelles portuarios, además de demostrar su viabilidad constructiva y económica en referencia al proyecto CADIMA¹⁸² (Martínez et al, 2010).

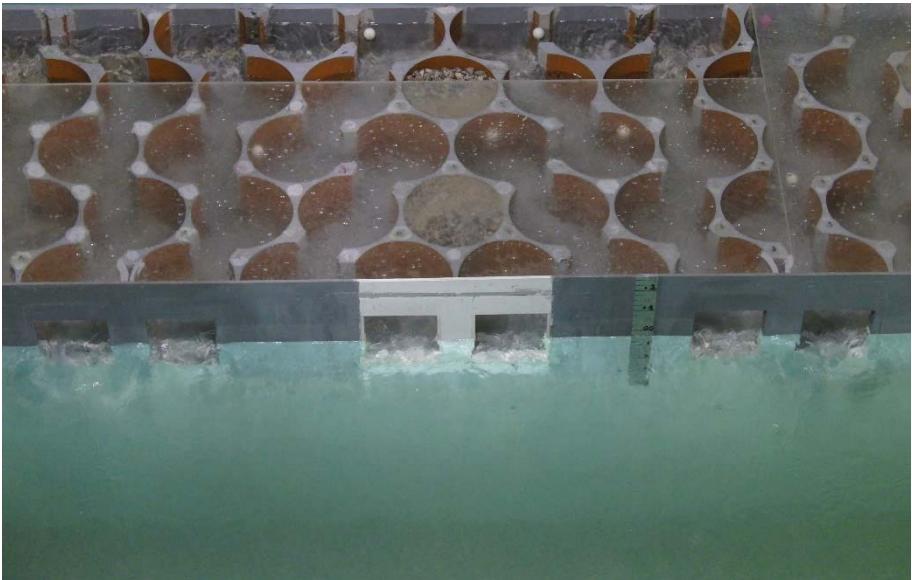
¹⁸²El proyecto CADIMA (2008-2011) analizó los cajoneros convencionales, los sistemas de producción habituales y los cálculos de armado y proyecto e cajones convencionales para definir alternativas de cajones de baja reflexión que se puedan fabricar sin alterar significativamente los plazos, costes y forma habitual de trabajo de los cajoneros convencionales, tanto de celdas cuadradas como circulares.

Para ello se ha definido y aplicado el concepto de circuito antirreflejante (Medina, 2009; González-Escrivá, 2011) a la transformación de estructuras ARJ para la atenuación de la resonancia en puertos, particularizándolo para las estructuras ARJ de circuitos disipativos largos, ARJ-R. Para poder atenuar el oleaje y las ondas de baja frecuencia en estructuras marítimas verticales para muelles, con las anchuras y métodos constructivos habituales, se incorporan diferentes cámaras de disipación con lo que se consiguen los efectos técnicos de las estructuras ARJ. A partir de cajones convencionales para muelle con manga de 36.95 m, eslora de 15.70 m y puntal de 13.5 m se configuran distintos esquemas de circuitos largos constituidos por la interconexión de celdas entre sí en distintas direcciones, de mayor longitud que el ancho de la estructura y abiertos al exterior a través de ventanas en el paramento frontal del muelle.

Justificada la necesidad de la verificación y análisis de las variables principales mediante la experimentación física a escala, se analizan las características particulares de las propuestas ARJ-R basadas en las modificaciones de cajones convencionales, a partir de la experiencia acumulada en varios proyectos de investigación relacionados con las estructuras marítimas verticales antirreflejantes ARJ, obteniendo las propuestas optimizadas para el estudio experimental que será objeto del siguiente capítulo.

CAPÍTULO V

Eficiencia de las estructuras ARJ-R: experimentación y optimización.



Experimentación física a escala de estructura ARJ-R en los ensayos CADIMA (2008-2011)

En capítulos anteriores se ha analizado la problemática de la resonancia en puertos indagando en las causas que la generan entre las que destacan principalmente las ondas de infragravedad ($30 < T[s] < 300$ s). Se han estudiado las diferentes aproximaciones que describen las oscilaciones y respuesta resonante en dársenas para la obtención de los periodos naturales y la potencialidad de amplificación de las oscilaciones. Análogamente a la amplificación que se produce para las frecuencias resonantes en cada ciclo de oscilación, una pequeña variación en la capacidad de disipación de la energía, expresada en términos del coeficiente de reflexión habitualmente, puede alterar el equilibrio hacia la amortiguación de la oscilación y la reducción de los efectos de la resonancia en puertos (Ippen y Goda, 1963)¹⁸³.

Se ha descrito el concepto de circuito para la modificación de las estructuras ARJ mediante la incorporación de circuitos disipativos largos, efectivos para reducir la reflexión en los paramentos interiores de las dársenas y así mitigar los efectos de la resonancia en dársenas. Asimismo, se justifica la idoneidad de las estructuras ARJ-R, obtenidas a partir de la modificación de muelles de cajones convencionales para su uso en dársenas portuarias, atendiendo a la funcionalidad y menor ocupación, además de ser viables constructiva y económicamente.

Se han analizado los complejos mecanismos disipativos de las estructuras ARJ, entre otras, reconociéndose la ineludible necesidad de la modelización física a escala de la interacción onda-estructura para la cuantificación de la eficiencia en la atenuación de las ondas largas. Sin embargo, las incertidumbres en la aplicabilidad de los procedimientos experimentales habituales motiva la definición de una metodología específica para el estudio de las ARJ-R.

Particularmente, los efectos de escala pueden ser importantes para los mecanismos de disipación de las ARJ, dado que, con generalidad, los efectos de la disipación son mayores a mayor reducción en el tamaño. En el presente capítulo se describe la experimentación llevada a cabo con modelos físicos a una escala (1:11.6) que se justificará como suficiente para soslayar las posibles diferencias entre modelo y realidad.

En el *Capítulo IV*, se han obtenido dos tipologías de ARJ-R, basadas en circuitos formados por unidades circulares o cuadradas, a partir de un cajón hueco representativo de los empleados habitualmente en la construcción de muelles convencionales de cajones. Se han definido tres posibles configuraciones para cada tipología ARJ-R, combinando distribuciones de circuitos y aberturas en el diseño, atendiendo a la amortiguación de los periodos resonantes que se producirán teóricamente en las condiciones habituales de ensayo en un canal de oleaje para experimentación física a escala.

¹⁸³Ippen y Goda (1963) estudian el efecto de la reducción del coeficiente de reflexión en un puerto rectangular estrecho abierto en un extremo a mar abierto, obteniendo que si se reduce el coeficiente de reflexión de 1.0 (completamente reflejante) a 0.9 la respuesta del puerto en términos del factor de amplificación se reduce a menos de la cuarta parte.

En definitiva, en el presente capítulo se evaluará la eficiencia de estas estructuras ARJ-R en la disipación de la energía de las ondas largas resonantes en una dársena rectangular mediante modelización física a escala, para ambas tipologías. En primer lugar se describe la experimentación llevada a cabo aplicando una novedosa metodología experimental específica para los ensayos de estructuras antirreflejantes frente a oscilaciones resonantes. En segundo lugar se exponen los resultados experimentales de las distintas estructuras ARJ-R, analizándose la evolución de la energía mediante un modelo exponencial con el que se obtienen varios indicadores de la eficiencia disipativa de las estructuras ARJ-R ensayadas. Se introduce el concepto de longitud efectiva del circuito antirreflejante, Be_c , como criterio para la optimización de la eficiencia. Finalmente, se propone un nuevo modelo de optimización de la eficiencia, expresado en términos del C_r para las estructuras ARJ-R en base a los resultados experimentales obtenidos.

V.1. Metodología experimental para el estudio de la efectividad de estructuras antirreflejantes ante onda larga en condiciones de resonancia

En los *Capítulos II y III* se analizaron las posibilidades de modelización física y numérica de los procesos resonantes y disipativos de las estructuras antirreflejantes, estableciéndose la necesidad de la modelización física a escala en la determinación de las características disipativas de las estructuras, como fin en sí mismo, o como paso previo a la calibración de un posible modelo numérico.

La modelización física a escala de la interacción onda-estructura para la cuantificación de la eficiencia en la amortiguación de las ondas largas no está exenta de incertidumbres¹⁸⁴, tales como:

- La generación de ondas largas con pequeña amplitud y su medición, y sobre todo si se utiliza sistema de absorción activa de reflexiones.
- la incertidumbre asociada a las técnicas de análisis de la reflexión de ondas más largas que el canal de ensayos.
- la dificultad en mantener el nivel medio del agua en el canal de ensayos, tanto en las proximidades del generador de oleaje como en modelo.
- el efecto de otros fenómenos que pueden derivarse de la amplificación de altura de onda por la resonancia, como el rebase.
- los efectos de escala y de modelo.

¹⁸⁴Durante el proyecto MUCAR (2008-2010) se desarrollaron una serie de experimentos en modelo físico a escala (1:35) en el LPC-UPV con ondas largas donde se pusieron de relieve los problemas expuestos (Medina et al, 2010).

A continuación se discuten los aspectos indicados con el objetivo de definir, en el apartado final, una nueva metodología específica para evaluar la eficiencia de estructuras en la atenuación de la resonancia en puertos.

V.1.1. Generación de ondas largas

La generación de ondas largas regulares progresivas por medios mecánicos en un canal de ensayos es compleja. Incluso cuando el movimiento oscilatorio de la pala generadora es perfectamente sinusoidal, los registros de las ondas generadas en distintas localizaciones del canal difieren de una señal sinusoidal. Este efecto es debido a la interacción no lineal de los armónicos que varían periódicamente con respecto a la distancia al generador de oleaje¹⁸⁵ como consecuencia de la diferencia en el movimiento real de las partículas de agua bajo la onda larga real y el producido por el generador. Existen numerosas técnicas de generación para minimizar dicho efecto introduciendo movimientos no lineales de compensación a la pala generadora.

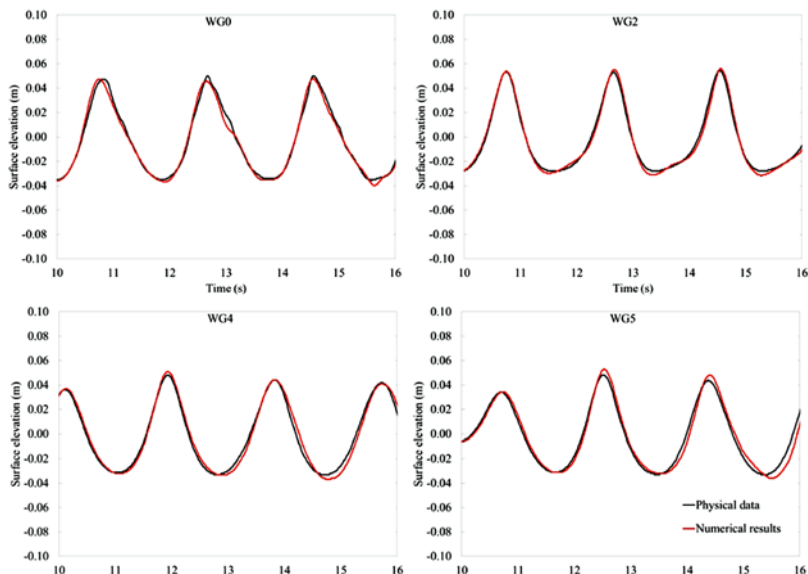


Figura V.1. Superficie libre generada ($d/L=0.1$, $Ur=25.4$) en canal de oleaje en cuatro ubicaciones distintas. (Oliveira et al, 2017)

En la resonancia, los armónicos también serán excitados, pero minimizándose su efecto, debido a la menor amplitud de las oscilaciones armónicas respecto de la principal. Por lo tanto, si el ensayo en el canal de oleaje se desarrolla con ondas largas en condiciones de resonancia o próximas a ésta, la generación con movimiento de pala sinusoidal reproducirá el fenómeno con un error no significativo.

¹⁸⁵Afectando a los esquemas convencionales de separación de oleaje incidente y reflejado que se basan en las medidas en una serie de sensores de nivel de agua distribuidos a lo largo del canal.

Por otra parte, las holguras entre la pala generadora de oleaje y los contornos del canal (laterales y fondo) producirán pérdidas de la eficiencia de la generación de oleaje con efectos en la amplitud, que a mayores pérdidas será menor. Así pues, las palas estancas son más eficientes para la más exacta reproducción del oleaje deseado.

V.1.2. Estimación del oleaje incidente y reflejado

Las características típicas de la escasa experimentación referida en la literatura científica (Tomita e Hiraishi, 1999; Yamada (2005); Hiraishi et al, 2006 y 2009; Tanaka et al, 2014; Ohshima et al, 2007; Nakahima, 2011) en relación a las estructuras para la absorción de onda larga¹⁸⁶ son:

- Modelización física a escala en canal de oleaje 2D.
- Escala geométrica 1:50, en general.
- Separación entre oleaje incidente y reflejado: a) el método 2-point de Goda y Suzuki (1976) o b) la medición directa previa a la reflexión en la pala generadora de oleaje.

V.1.2.1. Técnicas basadas en el método 2-point

La separación de oleaje incidente y reflejado en experimentación física de obras marítimas es un problema habitual que se suele resolver con alguna de las diferentes técnicas que existen. Las más comunes se basan en el método “2-point” de Goda y Suzuki (1976); por ejemplo el método “3-point” de Mansard y Funke (1980), el método “n-point” de Zelt y Skjelbreia (1992) o el de Baquerizo y otros (1997) con fondo variable. Sin embargo, el análisis del oleaje incidente y reflejado de baja frecuencia es un problema muy complejo que no está resuelto. Se podría pensar en utilizar, para ondas largas, los métodos existentes para ondas cortas, pero ello plantearía múltiples problemas de carácter teórico y práctico. Medina (2001) describe seis de las hipótesis explícitas e implícitas del método “2-point” (dispersión lineal, estacionariedad, superposición lineal, ondas periódicas, estimación global no causal, etc).

Entre los problemas teóricos que plantea utilizar métodos de ondas cortas para ondas largas, tenemos el incumplimiento claro de algunas de las hipótesis fundamentales como la estacionariedad (familia de métodos “2-point”) y muchas dudas sobre el cumplimiento de otras hipótesis como la dispersión y superposición lineal de ondas en una situación donde el oleaje incidente y reflejado tienen una potencia similar (probable interacción no lineal de ondas). Entre los problemas prácticos, la colocación de sensores (distancias muy grandes) y el impacto de los errores de

¹⁸⁶Las estructuras ensayadas en las referencias citadas se exponen en el *Capítulo III*, apartado *III.3 Estructuras antirreflejantes para ondas de largo periodo*.

medida y la no linealidad de las ondas reducen aún más la fiabilidad de estos métodos.

V.1.2.1. Técnicas basadas en la medición directa

La generación de onda larga en canales de ensayo puede producir la aparición de ondas armónicas que se superponen a la principal ocasionando diferencias en las mediciones dependiendo de la posición de medición en el canal. Asimismo, Goda (2010) indica que las estructuras ARJ generan ondas reflejadas con componentes armónicas de la onda incidente con el mismo efecto anterior. En estas situaciones, el resultado de la técnica es dependiente del punto de medición empleado. Si se utiliza la técnica habitual consistente en estimar el coeficiente de reflexión a partir del máximo y mínimo de la envolvente de las ondas, el resultado tenderá a un coeficiente de reflexión menor que el real.

V.1.3. Nivel medio del agua

La generación mecánica de ondas en un canal de ensayos tiende a producir un transporte de agua en superficie alejándose de la pala generadora, pasando a través del modelo¹⁸⁷, si la sección en la que se encuentra es permeable. Es conveniente disponer de un sistema que permita el retorno del flujo, de forma natural o forzada hacia el generador, de forma que el nivel medio en el tramo pala-modelo quede compensado. En el caso de ondas largas, las mayores velocidades a las que está sujeto el flujo, provocarán mayores pérdidas de energía en el flujo que atraviese la sección del modelo por lo que: 1) la circulación natural no podrá restablecer el flujo y, 2) en caso de poder provocar la circulación forzada sería necesaria una compleja estimación del caudal a restituir a partir de las pérdidas. Un proceso análogo tiene lugar en la parte trasera de la pala generadora si ésta no es perfectamente estanca, donde además de la posible acumulación de agua sin retorno completo, pueden producirse otros fenómenos resonantes con efectos no deseables.

Para mantener el nivel medio en ensayos en canal de oleaje con onda larga, parece razonable crear un volumen estanco entre la pala generadora de oleaje y el modelo (Le Méhauté et al, 1968) de forma que se evite el transporte de masa al exterior de dicho volumen de control. Esta técnica sólo será aplicable en ensayos sin rebase, con pala generadora estanca (con pared posterior en seco) y en los que se lleve a cabo una completa impermeabilización de la sección incluyendo la cimentación, con el fondo y lateralmente con los cajeros del canal.

V.1.4. Rebase

La amplificación de la altura de onda producida por la resonancia puede provocar rebases sobre la estructura ARJ-R, con efecto sobre la variación de nivel medio

¹⁸⁷Incluso con secciones de tipología vertical con pared trasera impermeable, el flujo puede atravesar la cimentación o pasar entre la sección y los cajeros laterales del canal, o, si se permite superiormente por rebase.

discutida anteriormente. Por lo tanto, para evitar dicho inconveniente la onda larga generada tendrá una amplitud suficientemente pequeña y, en su caso, la duración de la generación de ondas será limitada a una duración que no produzca rebase.

V.1.5. Efectos de escala y de modelo

Los efectos de escala y de modelo en la experimentación con ondas largas son, generalmente, los aspectos con más influencia en el resultado de la modelización, por lo que a continuación se analizan y discuten los potenciales impactos en los resultados.

V.1.5.1. Efectos de modelo

El principal efecto de modelo esperable en un canal de oleaje 2D es el efecto de los contornos, en los que las ondas largas reflejan una mayor cantidad energía, siendo inevitable la generación de reflexiones múltiples, según el eje principal del canal, entre el modelo y en la pala generadora. Existen técnicas de absorción activa de ondas, aunque todas ellas adolecen de similares problemas a señalados para los métodos de separación de oleaje incidente expuestos en el *apartado V.1.2.1*.

Las multirreflexiones entre la pala generadora y el modelo, en condiciones de estanqueidad, pueden asemejarse a las condiciones resonantes en una dársena rectangular estrecha y cerrada, pudiéndose instalar estructuras disipativas (ARJ-R) en uno de los dos extremos.

V.1.5.2. Efectos de escala

La adopción de la semejanza de Froude para escalar adecuadamente los fenómenos derivados de las fuerzas de gravedad y de inercia, produce que otras fuerzas (viscosidad, fricción, tensión superficial¹⁸⁸, etc., no queden correctamente representadas a escala, con lo que la precisión y fiabilidad de la experimentación depende del efecto de éstas en los procesos físicos a modelizar. En el caso de los ensayos en canal 2D de estructuras ARJ-R expuestas a ondas largas en condiciones próximas a las resonantes, los efectos de escala que pueden afectar a los mecanismos de disipación de energía son los derivados de las fuerzas viscosas y las debidas a la fricción.

Frente a la imposibilidad de obtener un modelo a escala con semejanza perfecta¹⁸⁹, la mayor parte de los problemas pueden simplificarse a partir de la interacción de

¹⁸⁸En estructuras ARJ con relleno granular será necesario considerar el efecto de escala de la transmisión en medio poroso mediante las técnicas de Le Méhauté o Keulegan, descritas en Hugues (1993). En Altomare y Gironella (2014) se discute el efecto del tamaño (escala del modelo) en estructuras ARJ con relleno granular, apoyando los resultados de Burchart (1999) en la selección de la escala de las escolleras a emplear.

¹⁸⁹No existe ningún fluido que permita satisfacer simultáneamente las relaciones entre las fuerzas en modelo y prototipo si el modelo es menor que el prototipo.

las dos fuerzas predominantes, adoptando semejanzas parciales¹⁹⁰. La relación dominante en los procesos de oleaje y otras oscilaciones de masas de agua, es la que indica la importancia relativa de las fuerzas de inercia que actúan en una partícula de fluido respecto al peso de la partícula (relación entre las fuerzas de inercia y las de gravedad). Para la modelización a escala se adopta, típicamente, la semejanza que se define a partir del número de *Froude*:

$$Fr = \frac{F_i}{F_g} = \frac{\rho \cdot L_*^2 \cdot V_*^2}{\rho \cdot L_*^3 \cdot g} = \frac{V_*^2}{g \cdot L_*} \quad (V.1)$$

donde F_i son las fuerzas de inercia, F_g , las fuerzas de gravedad, ρ la densidad del agua, L_* una longitud característica del fenómeno representado, V_* una velocidad característica y g la aceleración de la gravedad.

La importancia relativa de las fuerzas de inercia en una partícula respecto de las fuerzas viscosas sobre la misma es caracterizada mediante el número de *Reynolds*:

$$Re = \frac{F_i}{F_\mu} = \frac{L_*^2 \cdot V_*^2}{\nu \cdot V_* \cdot L_*} = \frac{L_* \cdot V_*}{\nu} \quad (V.2)$$

con F_μ las fuerzas viscosas y ν el coeficiente de viscosidad cinemática del agua.

Con lo que, si las fuerzas viscosas pueden tener importancia en el resultado de la modelización, entonces los números de *Reynolds* y *Froude* deberían mantenerse iguales en prototipo y modelo (semejanza de *Reynolds* y semejanza de *Froude*). Sin embargo, no es posible satisfacer simultáneamente la semejanza de *Reynolds* y la de *Froude*. La velocidad en un modelo con semejanza de *Reynolds* debe ser mayor que en prototipo, mientras que con semejanza de *Froude* ésta debe ser menor. Si se adopta la semejanza de *Froude* entonces la relación entre el número de *Reynolds* en prototipo y modelo es:

$$\lambda_{Re} = \frac{Re_{mod}}{Re_{prot}} = \lambda_L^{2/3} \quad \text{si} \quad \frac{Fr_{mod}}{Fr_{prot}} = 1 \quad (\text{semejanza Froude}) \quad (V.3)$$

donde los subíndices $_{mod}$ y $_{prot}$ hacen referencia a la escala del modelo y escala real (prototipo) respectivamente.

Con lo que las diferencias entre las fuerzas viscosas en modelo respecto del prototipo pueden provocar la aparición de efectos de escala.

Dado que, en general, el flujo a escala real será turbulento, si la escala del modelo es suficientemente grande¹⁹¹ el flujo en el modelo también será turbulento, con lo

¹⁹⁰En consecuencia, dado que las fuerzas de inercia están presentes en todos los problemas en el que existe un flujo, los posibles pares de fuerzas a considerar será los formados por todos los tipos de fuerzas en relación a las fuerzas de inercia.

¹⁹¹Lo que a escala de *Froude* implica mayor número de *Reynolds*.

que el comportamiento respecto de las fuerzas viscosas será semejante en modelo y prototipo y los efectos de escala serán no relevantes.

Las estructuras ARJ-R a estudiar experimentalmente constituyen una modificación de estructuras marítimas verticales de cajones de celdas circulares y cuadradas, en las que las estructuras son permeables debido a una serie de aberturas en el paramento frontal que conducen a unos circuitos formados por conjuntos de celdas interiores interconectadas entre sí. El agua puede así penetrar en el interior del cajón y circular sujeta a las condiciones de contorno impuestas por la geometría de los circuitos y por los niveles y velocidades de las partículas en el fluido. Así pues, las zonas en las que los mecanismos de disipación de energía pueden ser importantes son: 1) las entradas a las estructuras ARJ-R a través de las aberturas en el paramento frontal y entre celdas del mismo circuito, 2) los contornos de la dársena-canal de ensayos (fondo y cajeros) e interiores de la estructura ARJ-R (fondo y paredes celdas), y 3) la disipación viscosa interna en el seno del fluido.

A continuación se exponen diferentes situaciones en las que pueden aparecer efectos de escala por fuerzas viscosas, indicando las variables de longitud y velocidad características del flujo para la determinación del número de *Reynolds* así como la estimación del número de *Reynolds* crítico en cada caso.

- Flujo en una pared porosa: entradas a las estructuras ARJ-R a través de las aberturas en el paramento frontal y entre celdas del mismo circuito.

La disipación en la entrada a los circuitos y en los estrechamientos de sección entre celdas (si existen) es debida a dos efectos: la separación del flujo y la fricción en los contornos (ver apartado III.2.1); quedando representados por el coeficiente de resistencia, f , (Ecs. III.12 y III.13) y el coeficiente de inercia s , (Ec. III.14).

El efecto inercial de la pared es generalmente despreciable, mientras que el coeficiente de fricción (Ec. III.13) adopta valores menores para tamaños mayores, mostrándose dependiente de los efectos viscosos (Liu y Li, 2016)¹⁹². A falta de datos de prototipo que permitan contrastar los valores obtenidos, parece razonable proponer, en la medida de lo posible, escalas con números de Reynolds lo más próximos posible al rango de los ensayos a gran escala ($Re \geq 10^5$). Sin embargo, lo amplio de las diferencias en el rango de valores del número de Reynolds referenciados en Liu y Li (2016) puede conducir a proponer tamaños demasiado grandes sin una justificación clara.

¹⁹²Liu y Li (2016) definen una metodología para estimar el coeficiente de reflexión de cajones perforados a partir de coeficiente de resistencia de la pared. Obtienen los coeficientes de resistencia, relacionados con el número de Keulegan para un rango de valores del número de Reynolds, a partir de dos conjuntos de datos experimentales: uno correspondiente a ensayos a escala reducida y, un segundo de ensayos a gran escala. Los coeficientes de resistencia así obtenidos, son menores para números de Reynolds grandes (gran escala) que para números de Reynolds pequeños (pequeña escala), indicando la existencia de efectos de escala.

Otra aproximación para el estudio de los efectos de escala en este caso es el propuesto para flujo a través de estructuras porosas (ver Hudson, 1979; Le Méhauté, 1990; Hughes, 1991; Martín-Soldevilla, 1995). Se establece que las condiciones de flujo de agua a través de los huecos de la estructura en el modelo se aproximarán a las condiciones de flujo en prototipo para valores del número de Reynolds en el modelo $Re_{modelo} > 3 \cdot 10^4$. La velocidad y longitud características para la determinación del número de Reynolds son, respectivamente, la amplitud de la velocidad horizontal del fluido debido al oleaje incidente y el ancho del paramento frontal perforado de la estructura ARJ o entre celdas interiores.

- Resistencia por fricción superficial en los contornos interiores¹⁹³ de la estructura ARJ-R.

Lee y Raichlen (1971) analizan los efectos de escala provocados por las fuerzas de fricción en los contornos analíticamente. En primer lugar para flujo laminar en modelo y en prototipo, bajo la suposición de disipación exponencial de las ondas en una pequeña dársena rectangular, justifican la mayor disipación en modelos más pequeños a partir para relación entre las tasas exponenciales de amortiguación en modelo respecto del valor a escala real (prototipo):

$$e_{\beta} = \frac{\beta_{mod}}{\beta_{prot}} = \frac{1}{e_L^{3/4}} \tag{V.4}$$

donde $e_L = L_{mod}/L_{prot}$, la escala geométrica.

Sin embargo, lo habitual es que a la escala real el flujo turbulento esté completamente desarrollado, mientras en el modelo sea laminar. Para este caso, la disipación puede estimarse a partir de la expresión de la potencia disipada en por la fricción en una superficie:

$$P_{fr} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{fr} \cdot S \cdot v_*^3 \tag{V.4}$$

donde ρ es la densidad del agua, C_{fr} el coeficiente de fricción superficial (o de arrastre), S la superficie expuesta y v_* la velocidad característica.

De forma que la potencia disipada para distintos tamaños es parcialmente dependiente del coeficiente de fricción superficial, C_{fr} variable con el carácter laminar o turbulento del flujo¹⁹⁴. Lee y Raichlen (1971) obtienen una relación de escala para el coeficiente de fricción superficial:

¹⁹³Para la dársena-canal los efectos de escala por fricción son despreciables comparativamente.

¹⁹⁴Las expresiones empleadas por Lee y Raichlen (1971) para la estimación de los coeficientes de fricción superficial para flujo laminar y turbulento son:

$$C_{fr,laminar} = \frac{1.33}{\sqrt{Re_{modelo}}}; C_{fr,turbulento} = \frac{0.074}{Re_{prototipo}^{1/5}}$$

$$e_{C_{fr}} = \frac{18}{e_L^{3/4} \cdot Re_{prot}^{0.3}} \quad (V.5)$$

Dependiente tanto de la escala como del número de *Reynolds* en prototipo. Esta doble dependencia es discutida por Lee y Raichlen (1971) mostrando mediante un ejemplo la posibilidad de mayor disipación a menor tamaño pese a la dependencia de e_L .

Para poder establecer una conclusión respecto del efecto de escala por fricción en el caso en que el flujo pueda ser laminar en el modelo y turbulento en el prototipo, se analiza la dependencia de la resistencia por fricción superficial debida a las tensiones tangenciales entre el fluido y cualquier superficie, con el número de *Reynolds* por referencia a los ejemplos clásicos correspondientes a formas geométricas con aristas lisas y afiladas o redondeadas.

La Fig. V.2 representa la influencia del número de *Reynolds* en el coeficiente de arrastre para varias geometrías, mostrando la variación con el número de *Reynolds* paralelamente al desarrollo del régimen turbulento, para cuerpos con aristas y bordes redondeados. La estimación del número de *Reynolds* se efectúa con la amplitud de la velocidad horizontal del fluido debido al oleaje incidente en los circuitos como velocidad característica y el ancho de los circuitos como longitud característica.

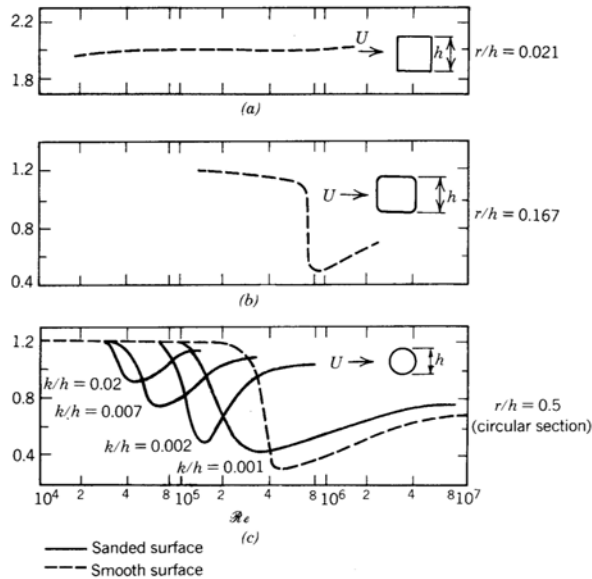


Figura V.2. Representación típica del efecto del número de *Reynolds* en el coeficiente de arrastre para varias formas geométricas. (Simiu y Scanlan, 1996).

La relación entre el coeficiente de arrastre de un cilindro en relación al número de Reynolds a distintas escalas habituales en la modelización física a escala de obras marítimas y a escala real se muestra comparativamente en la Fig. V.3.

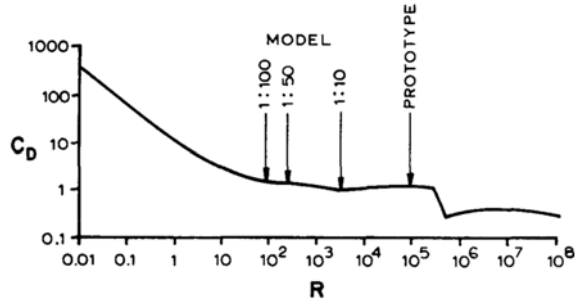


Figura V.3. Representación típica del coeficiente de arrastre de un cilindro vs Re . Adaptado de Simiu y Scanlan, (1996).

Sin embargo, las formas típicas en las estructuras ARJ-R se corresponden con formas geométricas con aristas y bordes afilados y lisos, para las que la Fig. V.2 demuestra la independencia del coeficiente de fricción superficial con el número de Reynolds, por lo que no serán de esperar efectos de escala.

- efectos de escala producidos por la viscosidad cinemática, asociada a la disipación interna.

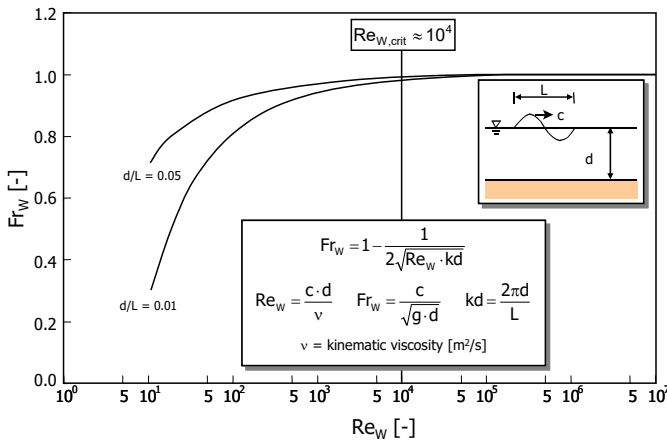


Figura V.4. Efecto de escala en la propagación de oleaje por efecto de la viscosidad cinemática. (Schütrumpf, 2001).

Los efectos de escala producidos por la viscosidad cinemática, asociada a la disipación interna, pueden evitarse modelizando a escalas de Froude en las que $Re \geq 10^4$ (Schüttrumpf, 2001; Korthenhaus, 2004). La Fig. V.4 muestra gráficamente la variación del número de *Reynolds* para valores de profundidad relativa asociados a condición de onda larga, indicando el valor crítico del número de *Reynolds*. La velocidad y longitud características para la determinación del número de *Reynolds* son, respectivamente, la celeridad de la onda en los circuitos y la profundidad en los circuitos.

- otros posibles efectos de escala.

Los efectos de la tensión superficial pueden considerarse despreciables puesto que las ondas son largas y la profundidad mayor de 2 cm.

Se descartan los efectos de las fuerzas elásticas, por el carácter incompresible del agua para los fenómenos considerados.

Asimismo, el empleo de agua dulce en lugar de salada, con reducción de la densidad entre un 3-5% (Le Méahuté, 1976; Vázquez et al, 2016) no provoca efectos de escala relevantes para los fenómenos considerados.

En resumen, supuesto el flujo en el prototipo turbulento, los efectos de escala producidos por las fuerzas viscosas podrán considerarse despreciables con ondas no rompientes siempre que el flujo en el interior de la estructura sea turbulento en el modelo, para los fenómenos considerados, siendo recomendable por lo tanto la realización de ensayos a gran escala con los límites indicados para cada caso.

V.1.6. Nueva Metodología Experimental específica de Simulación de Respuesta Resonante (MESRR) para el estudio de estructuras disipativas

El análisis de las incertidumbres expuestas, asociadas a la modelización física a escala de la interacción onda-estructura para la cuantificación de la eficiencia en la amortiguación de las ondas largas fundamenta la definición de una nueva metodología experimental específica más fiable.

La nueva metodología experimental se inspira en el proceso de resonancia unidimensional en una dársena rectangular estrecha cerrada en la que todos los contornos son reflejantes excepto un extremo que puede ser disipativo. La comparación entre las dársenas con diferentes elementos disipativos respecto de la dársena con todos los contornos reflejantes permite obtener las características disipativas del elemento a ensayar.

En los experimentos, la dársena rectangular estrecha cerrada quedará constituida por el tramo de canal de ensayos entre la pala generadora de oleaje (que deberá ser estanca) y el modelo del elemento disipativo, en este caso, las estructuras ARJ-R (cuya sección también deberá ser estanca para evitar fugas de agua). La longitud de

la dársena-canal de ensayos así formada determinará los periodos resonantes y sus armónicos (*Capítulo II*).

Para provocar la resonancia con la mínima disipación de energía por transferencia no lineal entre frecuencias, se prescribe la generación de ondas regulares largas mediante movimiento sinusoidal de la pala empleando un arranque suave¹⁹⁵, con periodo similar al del modo fundamental de resonancia de la dársena-canal de ensayos (o sus armónicos) sin producir rebase. La amplitud de la onda larga deberá ser pequeña, pero medible con la instrumentación disponible con la suficiente precisión. El proceso de acumulación de energía provocado por la acción externa del generador (con el sistema de absorción activa de reflexiones desactivado) continuará hasta el completo desarrollo de la respuesta resonante; cuando la amplitud ya no se incremente con el tiempo, o hasta que se alcance la amplificación tal que no se produzca rebase. Esta es la denominada *fase de acumulación de energía*.

Una vez se ha alcanzado el máximo nivel permitido de amplificación, bien porque se ha estabilizado la energía aportada con la disipada en el sistema, o bien porque se ha detenido el sistema para evitar rebase, se detiene el aporte externo de energía deteniendo suavemente el generador de ondas. A partir de este instante comienza la *fase de amortiguación*.

Desde la parada del generador de ondas, ya no se produce alimentación externa de energía, por lo que el sistema perderá energía paulatinamente, comportándose como un sistema subamortiguado¹⁹⁶ (ver *apartado II.3.1.1*), donde la relación de amortiguación puede aproximarse con un modelo exponencial (Keulegan, 1959):

$$\frac{H(t')}{H(t'_0)} = e^{-\beta \cdot t'} \quad (V.4)$$

Donde t' es el tiempo medido desde el inicio del ensayo, $H(t')$ es la altura de onda para un instante t' determinado en la fase de amortiguación en las proximidades del modelo, t'_0 es el instante de tiempo en que comienza la fase de amortiguación, β es la *tasa de amortiguación del sistema en función del tiempo*.

Para reducir el riesgo de efectos de escala, el tamaño del modelo se escogerá en relación a los números de Reynolds que aseguren la semejanza del flujo en modelo y prototipo, en la medida de lo posible.

¹⁹⁵Por arranque suave se entiende el inicio del movimiento del generador de ondas mediante una función lineal (rampa) que incrementa gradualmente el movimiento del generador desde el reposo hasta la amplitud objetivo.. Análogamente, por *parada suave* se entiende el fenómeno opuesto desde el completo movimiento en amplitud del generador hasta el reposo. Típicamente, suelen definirse rampas de una duración igual a unas pocas ondas, 2 en los ensayos ARJ-R.

¹⁹⁶La dinámica de un puerto en condiciones próximas a la resonancia es similar, al menos para el modo fundamental, al del resorte unidimensional. En éste, el principal efecto en la respuesta resonante al incrementar la constante de amortiguación es el descenso de la amplificación y el aumento del rango de frecuencias asociadas a una potencia igual a la mitad de la potencia de la oscilación, sin modificar significativamente la frecuencia resonante del sistema (Ippen y Goda, 1963).

La MESRR específica, propuesta para el análisis de la efectividad de estructuras disipativas de energía de onda larga en condiciones de resonancia, reduce las incertidumbres planteadas mejorando por lo tanto la fiabilidad de la experimentación física a escala y la extrapolación al mundo real de los resultados experimentales.

V.2. Descripción de los ensayos a escala reducida SRR de las estructuras ARJ-R

En el presente apartado se describe la experimentación física a escala reducida, aplicando la nueva MESRR descrita en el apartado anterior, para el estudio de las características disipativas de las estructuras ARJ-R definidas en el *Capítulo IV* frente a onda larga en condiciones de resonancia.

La necesidad de pala de generación de ondas estanca y escala relativamente grande condiciona sobremanera la instalación a emplear. La presente investigación experimental, se llevó a cabo en el Canal de oleaje y viento de gran escala del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX-CEPYC.

V.2.1. Instalación para la experimentación: Canal de ensayos y generador de ondas



Figura V.5. Canal de oleaje y viento de grandes dimensiones. Vista general (fuente: CEDEX, 2017).

El Canal de Oleaje de Grandes Dimensiones (ver *Figs. V.5 y V.7*) se encuentra situado en la nave de ensayos del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, en la Calle de Antonio López, 81, de Madrid. Tiene 90 m de longitud, 3,60 m de ancho, y profundidad variable de 6 m en la zona de generación a 4,5 m en la zona de ensayo, siendo el fondo regulable mediante placas independientes para la reproducción de la batimetría. Es una instalación singular, que entró en servicio en 1999, incorporando en 2009 un Túnel de Viento superpuesto al canal de ensayos (González-Escrivá, 2008), cuyo objeto es el ensayo de estructuras marítimas sometidas a la acción del oleaje y del viento, minimizando las distorsiones que se producen en ensayos de menores dimensiones.

El Canal de Oleaje ha sido empleado para el ensayo de múltiples estructuras marítimas, a escalas de 1:8 a 1:30, incluyendo varias estructuras antirreflejantes ARJ (Gutiérrez et al, 2006 y 2014). El Túnel de Viento se ha utilizado en la medida de esfuerzos sobre aerogeneradores marinos y en el estudio de rebases.

La generación del oleaje se realiza mediante una paleta rotacional accionada hidráulicamente, con la cara posterior seca y 22.5° de giro máximo. La parte posterior de la paleta es estanca y trabaja en seco, mediante un sistema de juntas neumáticas por lo que no se producen pérdidas entre la paleta y las paredes del canal (ver *Fig. V.6*). El generador es accionado mediante un sistema oleo-hidráulico de 300kw de potencia, pudiendo generar oleaje regular e irregular de hasta 1,6 m de altura de ola máxima. El Canal dispone de un sistema de absorción activa de reflexiones, con posibilidad de desconexión, con tres sondas de medida de sobreelevaciones.



Figura V.6. Vista cenital de la pala generadora de ondas estanca. (fuente: CEDEX, 2017).

Otras dimensiones relevantes para la posterior determinación de la escala de los modelos son los resguardos mínimos con referencia al borde superior de los cajeros del canal para las condiciones de ensayo más desfavorables, según responsables del CEDEX-CEPYC, son:

- 2 m para el nivel máximo del agua en reposo.
- 1.2 m desde las crestas de las olas máximas, puesto que las alturas máximas de oleaje son aproximadamente de 1.6 metros.
- 0.5 m desde la altura máxima de coronación de las modelas de estructuras marítimas.

V.2.2. Diseño experimental

El diseño experimental comprende: 1) la selección de la escala, 2) la disposición del modelo y de la instrumentación de medida en el canal de ensayos y 3) el diseño de la matriz de ensayos. Las características de la sección tipo (ver Fig. V.8) se han definido en la Sección IV.2.

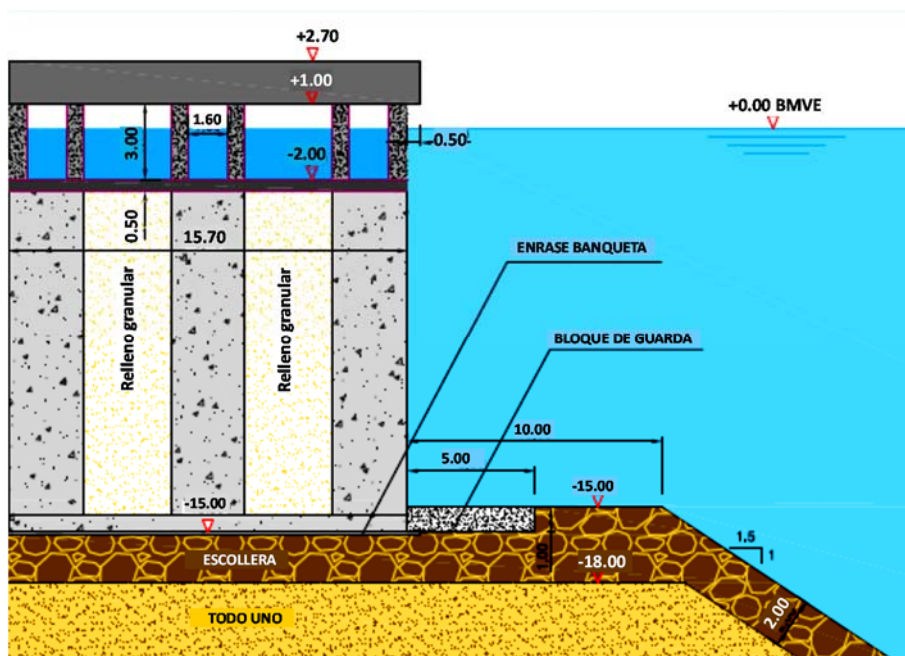


Figura V.8. Sección de la estructura ARJ-R en la presente investigación (escala prototipo).

V.2.2.1. Selección de la escala de los experimentos

Las escalas se regirán por la semejanza de Froude, al prevalecer las fuerzas de gravedad en los flujos de superficie libre respecto del resto. La escala geométrica se obtendrá a partir de las limitaciones geométricas (ver *Tabla V.1*):

- modeliza como mínimo una eslora del cajón de la estructura ARJ-R en el ancho del canal.
- la altura acumulada de la profundidad incrementada en el francobordo más el resguardo y sobreelevación del fondo deberá ser inferior a la altura de los cajeros laterales del canal.

Tabla V.1. Escala de modelo por limitaciones geométricas.

<i>Ajuste escala modelo</i>	Prototipo	Límite canal	1/e _L
ℓ_y =eslora cajón[m]	36.95	3.60 (ancho)	10.26
pendiente fondo [%]	1.50	X	
ℓ_{ra} = longitud rampa [m]	33.00		
d_{ra} [m]=altura rampa	0.50		
d_{pie} =prof. a pie estructura [m]	21.00		
d_c =francobordo [m]	2.70		
d_{res} =resguardo a cajeros s/h _c [m]	0.50		
$d_{pie}+d_{ra} + d_{res} + d_c$ [m]	24.70	4.50 (alto)	5.49

y de los requisitos para evitar los efectos de escala (ver apartado V.1.5.2), que se resumen en conseguir valores del número de Reynolds en el modelo $Re_{modelo} > 3 \cdot 10^4$ para que las condiciones de flujo de agua a través de los huecos de la estructura en el modelo tenga igual comportamiento que en prototipo (ver *Tabla V.2*).

Tabla V.2. Escala de modelo por efectos de escala para modelos ARJ-R-CI y ARJ-R-CU, de celdas circulares y cuadradas, respectivamente.

Datos prototipo celdas circulares

H[m]	T[s]	d[m]	d_{or} [m]	V_{Re} [m/s]	L_{Re} [m]	F_r [-]	R_c [-]
1	90	21	2	1.11	1.6	0.0781	1771779

Datos modelo celdas circulares

1/e _L [-]	H[m]	T[s]	d[m]	d_{or} [m]	V_{Re} [m/s]	L_{Re} [m]	F_r [-]	R_c [-]	>3·10 ⁴
15.2	0.066	23.11	1.38	0.132	0.28	0.106	0.0781	30000	SI

Datos prototipo celdas cuadradas

H[m]	T[s]	d[m]	d_{or} [m]	V_{Re} [m/s]	L_{Re} [m]	F_r [-]	R_c [-]
1	90	21	2	1.11	2	0.0625	2214723

Datos modelo celdas cuadradas

1/e _L [-]	H[m]	T[s]	d[m]	d_{or} [m]	V_{Re} [m/s]	L_{Re} [m]	F_r [-]	R_c [-]	>3·10 ⁴
17.6	0.057	21.45	1.19	0.114	0.26	0.114	0.0625	30000	SI

Con lo que para que el modelo se ajuste a las dimensiones geométricas del canal de ensayos la escala deberá ser menor que 1/10.3, mientras que para evitar efectos de escala, la relación de tamaños entre modelo y prototipo deberá ser mayor que 1/15.2. Por motivos constructivos se adopta la escala 1/11.6 (ver apartado V.2.3).

V.2.2.1. Ubicación de la instrumentación y del modelo en el canal de ensayos

Los ensayos consistieron en someter a la sección tipo a diferentes condiciones de ondas de baja frecuencia y oleaje¹⁹⁷ con el fin de analizar la efectividad del diseño para amortiguar la energía del oleaje y de las ondas de baja frecuencia. El procedimiento seguido para la toma de datos fue el siguiente

- Registro de la onda mediante los equipos de medida instalados en el canal de ensayos con frecuencia de 20 Hz (sondas en la zona de generación y en la zona anterior de la sección de ensayo; sensores en el fondo del canal). La duración de los registros es variable. Dependiendo del grado de amortiguación se detenía el registro de datos cuando la onda residual era del orden de 20 cm (escala prototipo).
- Grabación en video del ensayo¹⁹⁸, de manera que puede visualizarse a posteriori el funcionamiento del sistema diseñado para la absorción de la onda de baja frecuencia¹⁹⁹.

Con lo que la instrumentación dispuesta estaba formada por un sistema de medida del oleaje y un sistema de cámaras de vídeo.

El sistema de medida de oleaje está constituido por los siguientes dispositivos:

- Sondas AWA (*active wave absorption*): sistema de tres sondas dispuestas de forma alineada en el eje longitud del canal para la medida del oleaje generado por la paleta. Además de proporcionar las características de las ondas generadas, este sistema puede suministrar datos de las ondas reflejadas para el sistema de absorción de reflexiones que lleva incorporado el generador de ondas, para la corrección de los movimientos del generador.
- Sondas para la medida de las características del oleaje en la zona anterior de la sección tipo.
- Sensores de presión para la medida de amplitud de las ondas de baja frecuencia, dispuestos en el fondo del canal.
- Equipo de fotografía y vídeo para documentación fotográfica y filmación de video a fin de registrar de la evolución del flujo en los circuitos, utilizando

¹⁹⁷En la experimentación también se ha evaluado la efectividad de las estructuras ARJ-R en condiciones habituales de agitación (CEDEX, 2011 y 2012), para la absorción de oleaje regular e irregular, en este caso con el sistema de absorción activa conectado y empleando técnicas de separación de oleaje incidente y reflejado. Las características de los oleajes generados son (para oleaje irregular: espectro Josnwap con $\gamma=3.3$, con periodo pico $T=Tp$ y altura significante $H=Hs$):

- Periodos T: 6, 10 y 20 segundos
- Alturas de ola H: 0.7 metros
- Niveles de agua: ± 0.0

¹⁹⁸Esta característica ha permitido estimar visualmente la *longitud eficaz de circuito* que se definirá más adelante.

¹⁹⁹Se distribuyeron pequeñas bolas flotantes en el interior de algunas celdas con el fin de facilitar la visualización de los flujos de corriente en el interior de los circuitos de disipación.

trazadores esféricos de plástico para facilitar la visualización del flujo de corriente en el interior de los circuitos disipativos largos.

Por otra parte, la MESRR requiere que las ondas generadas provoquen la resonancia de la dársena-canal, o recinto entre la pala generadora y la sección del modelo ARJ-R. Los modelos ARJ-R-CI y ARJ-R-CU están diseñados para absorber ondas entre 80s y 100s de periodo, por lo que se selecciona el periodo de 90s para generar el modo fundamental de oscilación en la dársena-canal. La distancia de los modelos a la pala se corresponderá con la mitad de la longitud de onda estimada en 62.2 m^{200} .

En la Fig. V.9 se muestra un esquema de la disposición de la instrumentación y del modelo en el canal de ensayos. Entre la zona de generación y la zona de emplazamiento del modelo se dispone una rampa con el fin de reproducir el efecto de la disminución de la profundidad en la propagación del oleaje generado hasta el modelo.

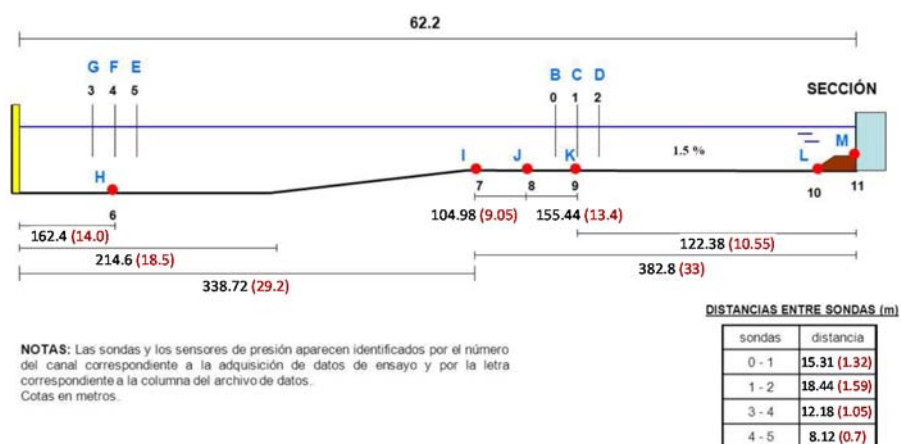


Figura V.9. Distribución de la instrumentación y ubicación de la sección en el canal de ensayos. Dimensiones en metros (en negro: escala de prototipo; en rojo y en paréntesis: escala de modelo).

V.2.2.1. Matriz de ensayos

En este apartado se definen las características de las ondas generadas para el estudio de la efectividad de las estructuras disipativas ARJ-R-CI y CU definidas y para la sección totalmente reflejante de referencia, mediante la metodología de simulación de respuesta resonante, MSERR, expuesta en el apartado V.1.6. Salvo indicación expresa, se utiliza la escala de prototipo para describir los ensayos.

²⁰⁰Dado que el fondo del canal es de profundidad variable, se ha estimado la distancia a la que debe situarse el modelo suponiendo una profundidad media de 26 m en el canal (21 m a pie de estructura).

La necesidad de comparar los resultados con los de una sección impermeable (paramento vertical cerrado) ha requerido la realización de dos tipos de ensayos:

- Ensayos de sección completamente reflejante REF.
- Ensayos de estructuras disipativas ARJ-R.

En ambos casos, el periodo seleccionado para generar ondas con el modo de oscilación fundamental en la dársena-canal es $T=90s$. También se ensayará el segundo armónico, $T=45s$, que oscilará con menor amplitud puesto que requiere más energía para su formación, pero con una respuesta distinta en la dársena-canal y también en los circuitos de las estructuras ARJ. Asimismo, para evaluar la respuesta de la dársena a ondas mayores se efectuarán pruebas con $T=135s$, con una longitud de onda mayor que el modo fundamental de oscilación de la dársena.

La metodología de acumulación de energía en los ensayos de onda larga (con el sistema de absorción activa de reflexiones desactivado y siendo la pala generadora estanca) implicará la generación de una onda de amplitud lo menor posible que pueda controlarse adecuadamente por el sistema de generación y que además pueda registrarse por la instrumentación de medida dispuesta. Se definen dos amplitudes para cada periodo en la generación de las ondas, $H_1/2$ y $H_2/2$, siendo H_2 la menor altura de ola que puede ser correctamente reproducida por el generador de oleaje para cada frecuencia y $H_1=2 \cdot H_2$.

La matriz de ensayos SRR sobre la sección completamente reflejante y las disipativas ARJ-R es la siguiente:

Tabla V.3. Matriz de ensayos.

número de ensayos		REFLEJANTE		ARJ-R 2 CIRCUITOS		ARJ-R 4 CIRCUITOS				ARJ-R 6 CIRCUITOS	
T[s]	amp pala	1-REF	2-REF	CI-1	CU-1	CI-2	CU-2	CU-2 cur	CU-2 rug	CI-3	CU-3
45	0.15		1					1	2		1
	0.25	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1
90	0.15	2	1	2	1	2	1	1	2	2	1
	0.25		2		1		1	1	2		1
135	0.65	1		1							

denominación de ensayos: "ESTRUCTURA PERIODO_AMPPALA.FASE+REPETICION"

ejemplo: CI-1 45_25.21

ESTRUCTUR REF (completamente reflejante) CI-N (2xN circuitos de celdas circulares) CU-N (2xN circuitos de celdas cuadradas)

AMPPALA: factor relacionado con la amplitud de la pala generadora (15=0.15; 25=0.25; 65=0.65)

FASE: 1 (periodo de experimentación 1) 2 (periodo de experimentación 2)

REPETICIÓN1 (sin repetición) 2 (1 repetición)

Incluyéndose ensayos adicionales de verificación de la repetitividad de los experimentos²⁰¹.

²⁰¹Es de esperar que la influencia de la variación de altura de ola en la tasa de amortiguación β sea nula, por lo que esos ensayos también proporcionarán más fiabilidad al procedimiento.

V.2.3. Construcción del modelo e impermeabilización

La MESRR requiere que el recinto definido en el canal de ensayos entre la pala generadora de ondas y el modelo a ensayar sea completamente estanco, sin fugas, de manera que se asegure la mínima pérdida de energía en los contornos del modelo, para reproducir el proceso de acumulación de energía que tiene lugar en condiciones de resonancia. Por lo tanto, con el fin de evitar cualquier tipo de transmisión de energía al exterior de la dársena-canal así constituida, se impermeabilizaron todas las juntas del modelo con las paredes y el fondo del canal de ensayos, construyéndose además la banqueta de manera que ésta fuera igualmente impermeable. Con esta disposición se garantiza que la amortiguación producida se deberá únicamente al efecto de los circuitos disipativos de las estructuras ARJ y a las pérdidas por fricción y disipación interna en la dársena²⁰².

Tras estudiar la compatibilidad entre las dimensiones de la instalación con las dimensiones de la sección a reproducir y profundidades de agua previstas, se determinó que el elemento principal del modelo lo constituye el cajón de celdas circulares²⁰³, siendo la dimensión crítica el diámetro de celda que en el prototipo es de 3.5 m. El empleo de elementos cilíndricos que facilitasen la construcción de los circuitos de celdas del cajón, condicionó la elección de la escala geométrica del modelo a $e_L = 1/11.6$ al utilizar tubos de PVC de 30 cm de diámetro. La escala elegida permite, asimismo, reproducir en el ancho del canal, de 3.6 m de ancho, un tramo equivalente a la longitud de un cajón, de manga igual a 36.95 m. (3.18 m en modelo).



Figura V.10. Construcción del modelo. Celdas circulares.

²⁰²Las pérdidas de energía en la dársena pueden obtenerse a partir de los ensayos con la sección vertical clásica, completamente reflejante, y por lo tanto estimar la amortiguación es producida exclusivamente por efecto disipativo de las estructuras ARJ-R.

²⁰³La mayor facilidad constructiva de las estructuras ARJ-R-CU, con circuitos rectangulares no condiciona la escala a adoptar, pudiendo adoptar la misma escala que los de celdas circulares.



Figura V.11. Construcción del modelo. Impermeabilización de la banqueta y construcción de la sección ARJ-R estanca.

Dado que el ancho del canal no coincide exactamente con la longitud del cajón, ha sido necesario completarlo con tramos impermeables a cada lado. Por ello, a ambos lados del tramo reproducido se construyó un tramo impermeable que representa el comienzo del cajón contiguo hasta completar la anchura del canal. En cada lado se han construido 21 cm (unidades de modelo) de muelle con pared vertical impermeable, equivalentes a 2.4 m en prototipo. De esta forma, la sección antirreflejante constituye un $36.95 / (36.95 + 2 \times 2.4) = 88.5\%$ del ancho del canal, con lo que la capacidad antirreflejante se limitará a dicha proporción, al ser el resto impermeable.

En cada operación de llenado la parte posterior del modelo se ha mantenido en seco para comprobar su estanqueidad, aunque posteriormente era llenada de agua por razones de estabilidad estructural durante los ensayos. Esta metodología

experimental ha sido especialmente diseñada para el estudio de la absorción de ondas de baja frecuencia constituyendo una metodología no convencional.

Los modelos correspondientes a la sección vertical clásica impermeable (ver Fig. V.12) se obtienen sobre las tipologías ARJ-R mediante el sellado de las ventanas de acceso a los circuitos en el panel frontal.



Figura V.12. Modelos de estructura vertical clásica (CEDEX, 2011 y 2012).



Figura V.13. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-1 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-1 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de dos circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).

Las Figs. V.13, V.14 y V.16 muestran los modelos de las estructuras ARJ-R de circuitos disipativos largos descritos en la presente investigación (ver apartado IV.2), construido a la escala $e_L = 1/11.6$ adoptada. Se muestran las dos tipologías ARJ-R-CI y ARJ-R-CU, basadas en cajones de celdas circulares y cuadradas, con diseños de 2, 4 y 6 circuitos disipativos largos en cada.



Figura V.14. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-2 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-2 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de cuatro circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).

Adicionalmente, se incluyen modelos con modificaciones en las estructuras ARJ-R-CU2, de 4 circuitos, incorporando cambios en la geometría con acuerdos curvos que minimicen las pérdidas en los circuitos, así como cambios en la rugosidad mediante estrechamientos de las aberturas entre celdas que incrementan la disipación de energía en los circuitos (ver Fig. V.15).

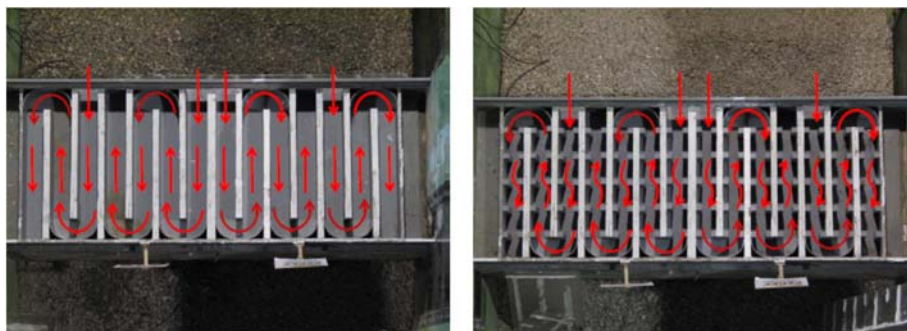


Figura V. 15. Modelos de estructuras ARJ-R-CU-2 de celdas cuadradas con diseño de cuatro circuitos disipativos largos modificados con geometrías curvas para incrementar la velocidad del flujo en los circuitos (ARJ-R-CU-2* izquierda) y añadiendo elementos disipadores de energía en los circuitos (ARJ-R-CU-2** derecha) (CEDEX, 2011 y 2012).

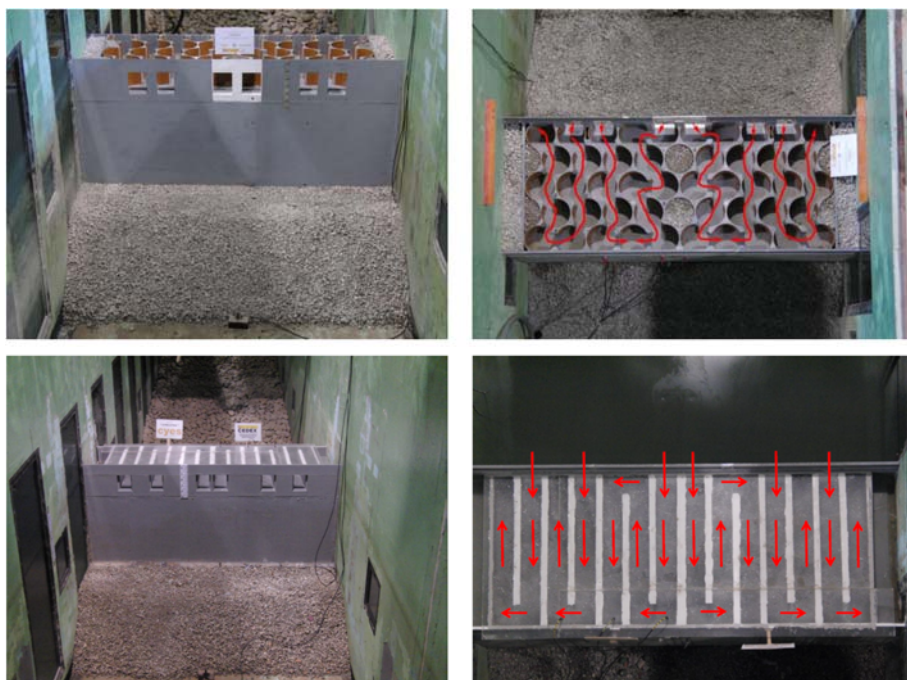


Figura V. 16. Modelos de estructuras ARJ-R-CI-3 de celdas circulares (superior) y ARJ-R-CU-3 de celdas cuadradas (inferior) con diseño de seis circuitos disipativos largos (CEDEX, 2011 y 2012).

V.3. Metodología de análisis específica para los ensayos de Simulación de Respuesta Resonante (SRR).

La MESRR define dos fases en la ejecución de los ensayos, una primera fase en la que el generador de ondas, con movimiento sinusoidal, aporta energía externa al sistema estanco, sin fugas, de la dársena-canal. Puesto que las únicas pérdidas en el sistema serán las de fricción en los contornos, disipación interna en la dársena-canal y las producidas por los circuitos disipativos de las estructuras ARJ-R, la energía aportada superará las pérdidas provocando una *fase de acumulación* de energía en el sistema. Además, si el sistema es excitado en condiciones próximas a las condiciones resonantes, las pérdidas serán aún menores al minimizarse las producidas por la transferencia no lineal entre ondas de distinto periodo y fase²⁰⁴.

Sin embargo, la estimación de la frecuencia resonante se ve afectada por cambios en la fase de la onda reflejada debidos a la variación de profundidad del canal de ensayos, la banqueta y de los propios circuitos; aumentado la probabilidad de que la resonancia no sea perfecta y haciendo más complejo el análisis de esta fase de acumulación de energía.

Una vez alcanzado el máximo permitido de amplificación en el ensayo SRR²⁰⁵, el generador de ondas cesa el aporte de energía, comenzando la *fase de amortiguación* en la que las oscilaciones libres resonantes se muestran con mayor claridad. Si la frecuencia con la que el sistema es forzado es próxima a la resonante, la transición al sistema de oscilaciones libres es prácticamente continua. En esta fase, en la que no existe alimentación exterior al sistema, únicamente se produce la pérdida de energía en el tiempo por la fricción en los contornos y la disipación interna en la dársena-canal, y por los mecanismos disipativos de los circuitos de las estructuras ARJ-R.

V.3.1. Modelo exponencial para la fase de amortiguación de los ensayos SRR.

En el caso de un ensayo SRR sobre un sistema ideal sin pérdidas, la acumulación de energía en resonancia se incrementaría indefinidamente hasta finalizar el aporte de energía de la acción exterior. A partir de ese instante $t'=t_o'$ ($t=0$) comienza la fase de amortiguación (ver *Fig. V.17*), en la que la energía es constante al no existir aportes ni pérdidas. Un sistema real disipativo alcanzaría un nivel menor de energía en $t=0'$ donde comenzaría a amortiguar energía en cada oscilación.

²⁰⁴En el *apartado II.3.1.1* se expone el comportamiento simplificado de las oscilaciones forzadas como la que se refiere en la MESRR.

²⁰⁵La amplificación se ha estabilizado y las oscilaciones consecutivas no aumentan su amplitud o ésta no se ha estabilizado aún pero si se mantiene puede provocar pérdidas por rebase.

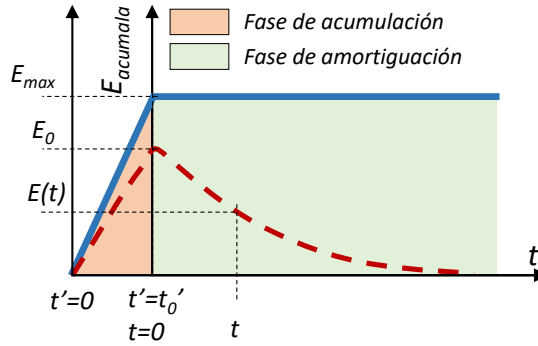


Figura V.17. Representación esquemática de la evolución de la energía en a) un sistema ideal sin pérdidas (línea azul continua), y b) en un sistema con pérdidas (línea roja discontinua) en un ensayo ejecutado con la MESRR.

En la dársena-canal estanca, en la fase de amortiguación, el equilibrio entre la variación de energía de las ondas dE/E y las pérdidas *por cualquier causa*²⁰⁶ D , en una fracción de tiempo pueden expresarse:

$$\frac{1}{E} \cdot dE = -\frac{D}{E} \cdot dt \quad (V.5)$$

siendo t el tiempo con origen en el inicio de la fase de amortiguación. Entonces, planteando límites de integración para un instante t cualquiera, a partir de una energía inicial E_0 , en $t=0$ (y por lo tanto $t=0$):

$$\int_{E_0}^E \frac{dE}{E} = -\int_0^t \frac{D \cdot dt}{E} \quad (V.6)$$

definiendo el *Módulo de disipación en el tiempo* Λ como:

$$\Lambda = 2 \cdot \beta = -\frac{1}{t} \int_0^t \frac{D \cdot dt}{E} \quad (V.7)$$

donde β es la tasa de amortiguación (ver Ec. V.4 y apartado II.2.1), quedando la expresión de la Ec.V.6:

$$\frac{E(t)}{E_0} = e^{-2 \cdot \beta \cdot t} = e^{-\Lambda \cdot t} \quad (V.8)$$

En una oscilación completa, con $t=T$, la variación de energía de las ondas en una oscilación queda:

$$\frac{E(T)}{E_0} = e^{-2 \cdot \beta \cdot T} = e^{-\Omega} \quad (V.9)$$

en función del *Módulo de disipación por oscilación* $\Omega = 2 \cdot \beta \cdot T$.

²⁰⁶Como se ha referido anteriormente, las pérdidas en los ensayos SRR serán las de fricción en los contornos de la dársena-canal, la disipación interior en el seno del fluido y la provocada por los circuitos de las estructuras ARJ-R.

Si el módulo de disipación de energía $A=2\cdot\beta$ en cada oscilación es constante, entonces la evolución de la disipación de energía en la fase de amortiguación puede representarse mediante un modelo exponencial. Asumiendo que en la Ec. V.7, el término D/E es independiente de n , puede interpretarse el módulo de disipación por oscilación, $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$, como la energía perdida en un ciclo completo respecto de la energía de la onda en ese mismo ciclo.

V.3.1.1. Cancelación del efecto disipativo de la dársena-canal en los experimentos SRR

En un caso real, como el de los ensayos SRR de estructuras ARJ-R, existen pérdidas de energía por *varias causas*: fricción en los contornos de la dársena-canal, disipación interna y en los circuitos de las estructuras ARJ-R. Si cada uno de dichos procesos disipativos puede ser representado aisladamente por su tasa de amortiguación β_i , entonces si dichos procesos tienen lugar simultáneamente en un sistema con la misma energía inicial E_o , la tasa de amortiguación conjunta β_T es igual a la suma de las tasas de amortiguación aisladas.

Así pues, es posible separar los efectos disipativos de las estructuras disipativas (ensayos con estructura ARJ-R) respecto de los efectos de la dársena-canal (ensayos con estructura REF):

$$\beta_{ARJ-R}^* = \beta_T^* - \beta_{REF}^* \quad (V.10)$$

V.3.1.2. Corrección por tramos completamente impermeables

La elección de la escala del modelo a ensayar (ver apartado V.2.3) produce una diferencia entre el ancho del canal (3.6) y el ancho de la estructura ARJ-R (36.95 m, en prototipo, 3.18 m en modelo). Se completa la sección del canal con estructuras completamente reflejantes (disipación nula $D=0$), a ambos lados, en prolongación de la estructura ARJ-R (centrada en el eje del canal ocupando el 88.5% del ancho).

Puesto que el módulo de disipación por oscilación, $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$ se corresponde con la disipación relativa de energía en una oscilación completa:

$$\Omega = 2 \cdot \beta \cdot T = -\frac{D}{E} \quad (V.11)$$

la tasa de amortiguación correspondiente exclusivamente al ancho de la estructura ARJ-R puede obtenerse asumiendo que la energía disponible puede estimarse en relación a dicho ancho (ver Fig. V.18):

$$\beta_{ARJ-R} = \frac{\beta_{ARJ-R}}{0.885} \quad (V.12)$$

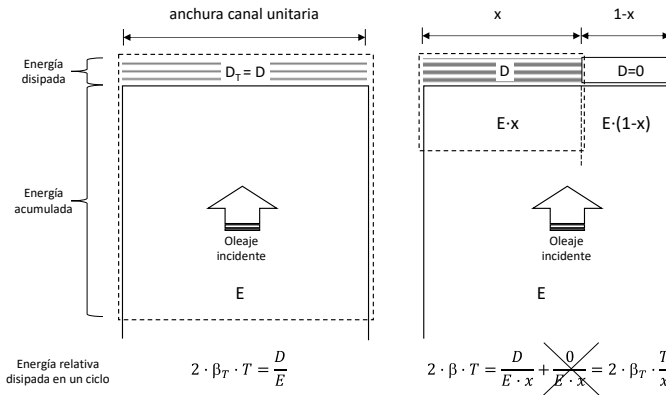


Figura V. 18. Sistemas con idéntica energía disipada. Esquema del canal en planta.

V.3.1.3. Reducción de la tasa de amortiguación de una estructura ARJ-R a un circuito disipativo equivalente de igual disipación.

El procedimiento descrito en el apartado anterior puede emplearse para la cancelación del efecto disipativo de los tramos completamente reflejantes entre aberturas de circuitos y entre las aberturas laterales y los extremos de la estructura ARJ-R²⁰⁷ (ver Fig. V. 19).

Cada circuito del mismo tipo e igual longitud presentará la misma tasa de amortiguación que el tramo equivalente al agrupar todos los circuitos. Entonces, es posible obtener la tasa de amortiguación por circuito equivalente β_c de una determinada estructura ARJ-R, en relación la relación del ancho relativo de aberturas²⁰⁸ ν , o porcentaje de la longitud de aberturas en el paramento frontal respecto del ancho del cajón:

$$\nu = \begin{cases} 2 \cdot \frac{2.4}{36.95} = 0.130 & \text{ARJ - R con dos circuitos} \\ 4 \cdot \frac{2.4}{36.95} = 0.260 & \text{ARJ - R con cuatro circuitos} \\ 6 \cdot \frac{2.4}{36.95} = 0.390 & \text{ARJ - R con seis circuitos} \end{cases} \quad (\text{V.13})$$

obteniéndose, en función del número de circuitos:

$$\beta_{ARJ-R,c} = \frac{\beta_{ARJ-R}}{\nu} \quad (\text{V.14})$$

²⁰⁷El procedimiento que se describe es una aproximación teórica.

En primer lugar, estructuralmente es necesario algún tramo vertical completamente reflejante.

En segundo lugar, el efecto disipativo de las contracciones y expansiones del flujo en las fases llenante y vaciante del cajón no queda bien representado en el esquema simplificado al agrupar las aberturas (Fig V.19). Sin embargo, como en su posterior uso para la sección optimizada, probablemente las distancias entre aberturas serán mayores que las necesarias para producir la disipación equivalente por contracción y expansión del flujo, el efecto final se considera correcto.

²⁰⁸Con definición conceptual análoga a la relación del ancho de bocana Ec. II.45.

En el que cada circuito, o conjunto de circuitos tendrá la misma tasa de amortiguación, que en caso de un conjunto de circuitos de distinta longitud se corresponderá con la tasa de amortiguación del circuito equivalente²⁰⁹.

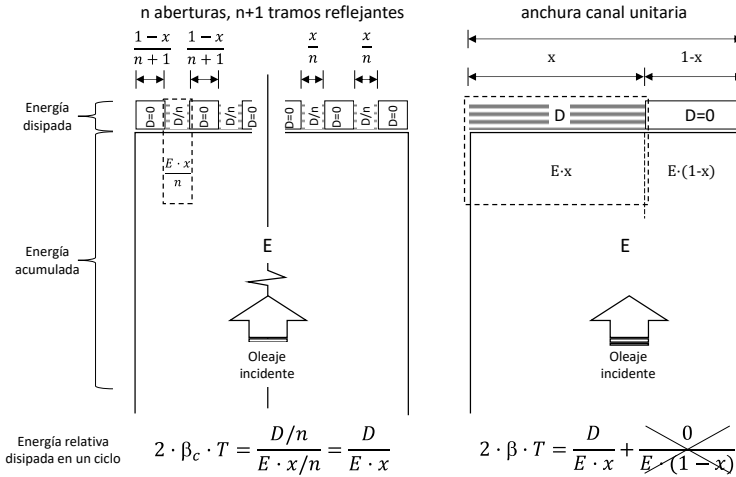


Figura V.19. Sistemas equivalentes. Esquema del canal en planta.

V.3.1.4. Coeficiente de reflexión

Asumiendo que la energía de las oscilaciones puede considerarse proporcional al cuadrado de la altura de onda la de energía disipada relativa en una oscilación completa (Ec. V.9) puede expresarse (ver Ec. V.4 y apartado II.3.1.1):

$$\frac{H(t+T)}{H(t)} = \sqrt{\frac{E(t+T)}{E(t)}} = \sqrt{e^{-2\beta \cdot T}} \quad (V.15)$$

pudiendo estimarse el coeficiente de reflexión²¹⁰, C_r :

$$C_r = \frac{H_{ref}}{H_{inc}} = \frac{H(t+T)}{H(t)} = e^{-\beta T} \quad (V.16)$$

V.3.1.1. Indicadores de eficiencia

La metodología de análisis de los resultados experimentales obtenidos con la MESRR para al análisis de la eficiencia de estructuras antirreflejantes en la atenuación de la resonancia en puertos se basa en el ajuste de la fase de amortiguación a una función exponencial, en el que el sistema disipa una proporción constante de energía

²⁰⁹Si todos los circuitos son iguales, entonces la tasa de amortiguación β es igual para todos ellos, siendo la energía disipada absoluta disipada por cada uno proporcional a su anchura (ancho ventana) relativa.

²¹⁰Puesto que la altura de ola que incide en el instante t , se refleja en la estructura siendo afectada por la disipación, transformándose en $H_{ref}=H(t) \cdot C_r$ reflejándose de nuevo en la pala generadora sin cambios ($C_r=1$) y llegando nuevamente como incidente a la estructura en $t+T$.

por unidad de tiempo. La eficiencia de las estructuras ARJ-R se estimara a partir de la obtención de los siguientes indicadores de eficiencia:

- t_{50} , definido como el tiempo observado para reducir la energía a la mitad, calculado a partir de la estimación de la evolución de la energía en el dominio del tiempo.
- módulo de disipación por ciclo $\Omega=2 \cdot \beta \cdot T$, con β estimada a partir de t_{50} :

$$\beta = \frac{1 - \ln(1/2)}{2 \cdot t_{50\%}} \quad (V.17)$$

- Los coeficientes de reflexión de las estructuras antirreflejantes y del circuito disipativo equivalente.
- *Longitud efectiva de circuito*, estimada visualmente a partir de los registros en vídeo realizados en los ensayos SRR, como la longitud que alcanza la oscilación en el circuito para los periodos ensayados.

V.3.2. Estimación de la energía en el dominio del tiempo

La necesaria estimación de la evolución en el tiempo de la energía de las oscilaciones en la fase de amortiguación en los ensayos SRR puede obtenerse a partir de las series temporales de los desplazamiento vertical de la superficie libre (ver Figs. V.20 y V.21) elevados al cuadrado y posteriormente filtradas para su suavizado mediante el uso de ventanas triangulares tipo Barlett o mediante la función SIWEH (Funke y Mansard, 1980)²¹¹.

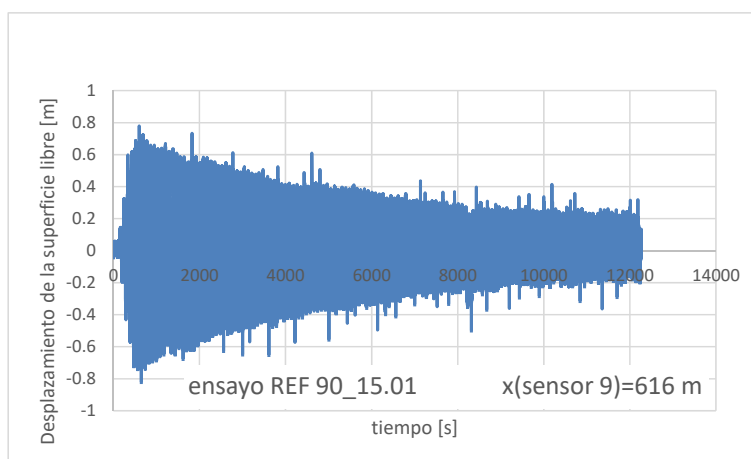


Figura V.20. Serie temporal típica de los desplazamientos verticales de la superficie libre en un ensayo SRR.

²¹¹SIWEH = smoothed instantaneous wave energy history. Funke y Mansard (1980) muestran como la función SIWEH una mejor identificación de los grupos de ondas, mientras que el empleo de las ventanas Barlett consigue un mejor alisado de la función.

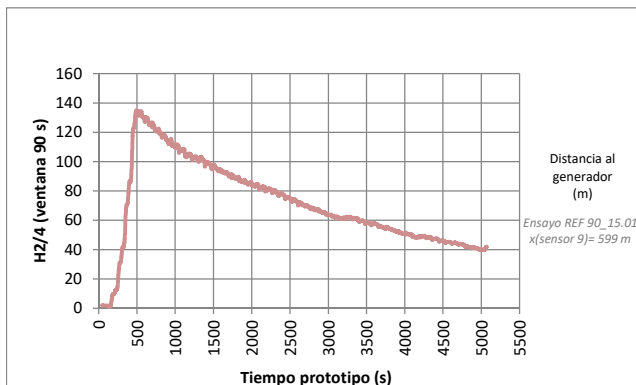


Figura V.21. Estimación de la evolución de la energía de las oscilaciones en el tiempo (fase acumulación + fase amortiguación).

El inicio de la fase de amortiguación, así como el valor absoluto de la energía es variable para cada ensayo dependiendo de las características del mismo, por lo que para homogeneizar las series debe:

- Referirse el origen de tiempos al inicio de la fase de amortiguación.
- Normalizarse la energía máxima al inicio de la fase de amortiguación $E_0=1$.

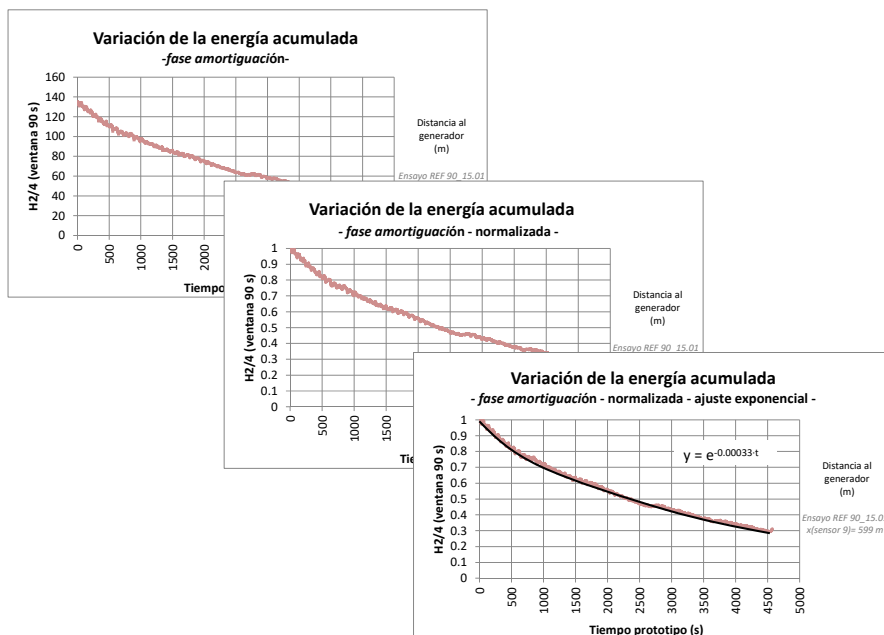


Figura V.22. Secuencia para la homogeneización del origen de tiempos y normalización de la energía en la fase de amortiguación de un ensayo SRR.

Como se muestra en la secuencia de gráficas de la *Fig. V.22*, donde puede ajustarse una expresión exponencial con energía inicial unidad:

$$E(t) = e^{-2\cdot\beta\cdot t} \quad (V.18)$$

V.4. Resultados experimentales.

Los resultados de la experimentación a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de circuitos disipativos largos, para las dos tipologías ensayadas (CI=celdas circulares, CU=celdas cuadradas) mediante la MESRR, comprende:

- Las series temporales obtenidas por medición directa con la instrumentación definida en el diseño experimental, a escala de prototipo.
- Resultados de la eficiencia de las estructuras ARJ-R obtenidos a partir de la metodología de análisis específica para ensayos SRR basada en el modelo exponencial (ver *apartado V.3.1*).
- El análisis de los registros gráficos, fotografías y vídeos efectuados durante los ensayos.

V.4.1. Series temporales de evolución de la superficie libre en el tiempo.

El análisis espectral confirma las frecuencias efectivamente resonantes en la dársena-canal, con picos correspondientes al primer y segundo modos resonantes asociados al periodo fundamental y primer armónico, respectivamente. Aparecen esporádicamente algún pico de baja potencia correspondiente al segundo armónico u otras frecuencias. La *Tabla V.4* recoge los periodos obtenidos en el análisis, para los sensores S3 S5, S9 y S11, destacando en negrita los más energéticos²¹². La serie completa de espectros de potencia analizados (ver *Tabla V4*) correspondientes al sensor 9 se reproduce íntegramente en el *Anejo 1*.

La selección del sensor que se empleará para el análisis se basa en criterios de estabilidad y representatividad. Los sensores de nivel de agua situados en superficie y en el fondo, a lo largo de la dársena-canal (ver *Fig. V.9*) registran la elevación de la superficie libre con una frecuencia de muestreo en modelo de 20Hz en los ensayos SRR. El análisis de los registros de los distintos sensores muestra una mayor dispersión en los sensores más próximos a la estructura. Este comportamiento se repite en todos los ensayos, por lo que se decide utilizar el sensor 9²¹³ (a 599 m de la pala generadora, y a 122 m de la estructura a escala de prototipo), por la mayor estabilidad y suficiente amplificación para el posterior análisis.

²¹²Se efectuaron un mayor número de pruebas para comprobar la tendencia resonante de la dársena canal.

²¹³Las series analizadas expuestas en el presente documento corresponden a los registros obtenidos mediante el sensor 9, situado en el fondo del canal bajo la sonda central del grupo de sondas en la zona anterior de la sección de ensayo. Este dispositivo es más adecuado que las sondas de superficie para este tipo de ondas de largo periodo y pequeña amplitud.

Tabla V.4. Identificación de los modos resonantes en los ensayos SRR.

<i>Analisis espectral con SIGVIEW ®</i>				
$T_{generado} [s]$	<i>Sensor</i>	$T_{modo 1} [s]$	$T_{modo 2} [s]$	$T_{otros} [s]$
45	S3	87.2	42.3	-
	S5	87.2	42.0	-
	S9	-	42.0	-
	S11	87.2	42.3	28.8
60	S3	87.2	42.3	-
	S5	87.2	42.3	28.8
	S9	87.2	42.3	28.8
	S11	87.2	42.3	28.8
75	S3	87.2	42.1	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.0	27.2
	S11	87.2	42.0	28.8
90	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	-	-
	S11	87.2	-	-
120	S3	85.9	41.9	118.7
	S5	85.9	42.0	-
	S9	85.9	42.0	118.7
	S11	85.9	42.0	118.7
135	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.1	-
	S11	87.2	42.1	-
180	S3	87.2	42.1	-
	S5	87.2	42.1	-
	S9	87.2	42.1	28.8
	S11	87.2	42.1	28.8
300	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.1	-
	S11	87.2	42.1	-

La Fig. V.23 muestra los espectros de potencia en el sensor de referencia correspondientes a ensayos SRR con generación de ondas con periodos de 45, 90 y 135 s, a escala de prototipo. Los periodos resonantes obtenidos en los experimentos asociados a los picos del espectro de potencia obtenidos en el análisis espectral se aproximadamente con los inicialmente con lo que el efecto de la berma, de los circuitos y de la variación de profundidad no son muy relevantes.

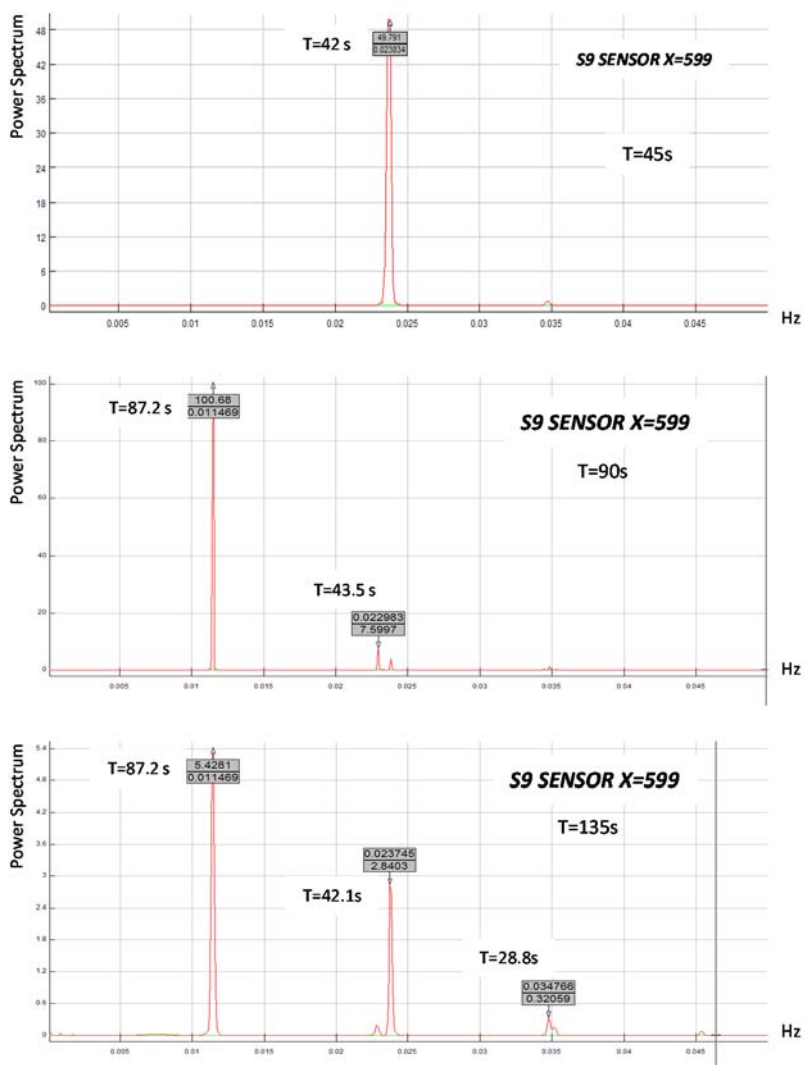


Figura V.23. Espectros de potencia típicos de ensayos SRR medido en el sensor 9 para ondas generadas de $T=45$, 90 y 135 s.

Las ondas generadas en los ensayos SRR, provocan ondas estacionarias de amplitud finita, con las mayores amplitudes en las proximidades de los antinodos, localizados en los extremos. Por otra parte, el efecto de las reflexiones en la berma de la estructura así como en los cambios de profundidad en el canal modifica la forma de la envolvente (ver Fig. V.24).

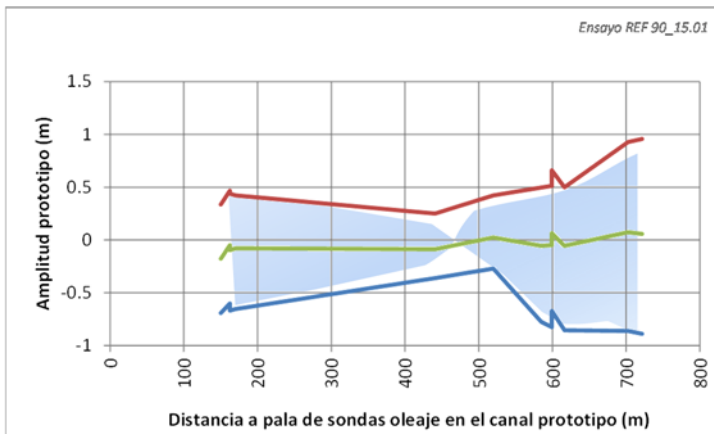


Figura V.24. Representación típica de la envolvente y valor medio de los desplazamientos de la superficie libre con $T=90$ s (escala prototipo).

El efecto de la variabilidad de la energía en el tiempo con la distancia al generador del oleaje se muestra en la Fig. V.25, obteniéndose los máximos valores en los extremos de la dársena-canal a escala de prototipo.

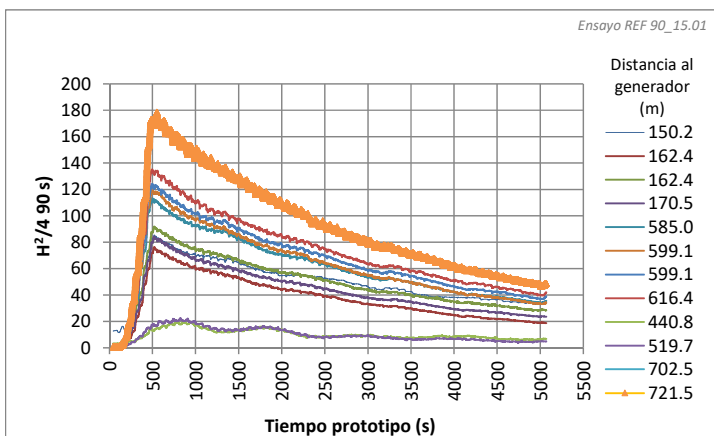


Figura V.25. Representación típica de las series temporales estimadas de evolución de la energía en un ensayo SRR con $T=90$ s (escala prototipo).

Las Figs. V.26 a V.28, reproducen las series temporales de desplazamiento vertical de la superficie libre registradas en el sensor 9 para los ensayos con $T=90$ s de la estructura completamente reflejante y de las estructuras ARJ-CI y ARJ-CU de 0, 2 y 4 circuitos, respectivamente (escala prototipo).

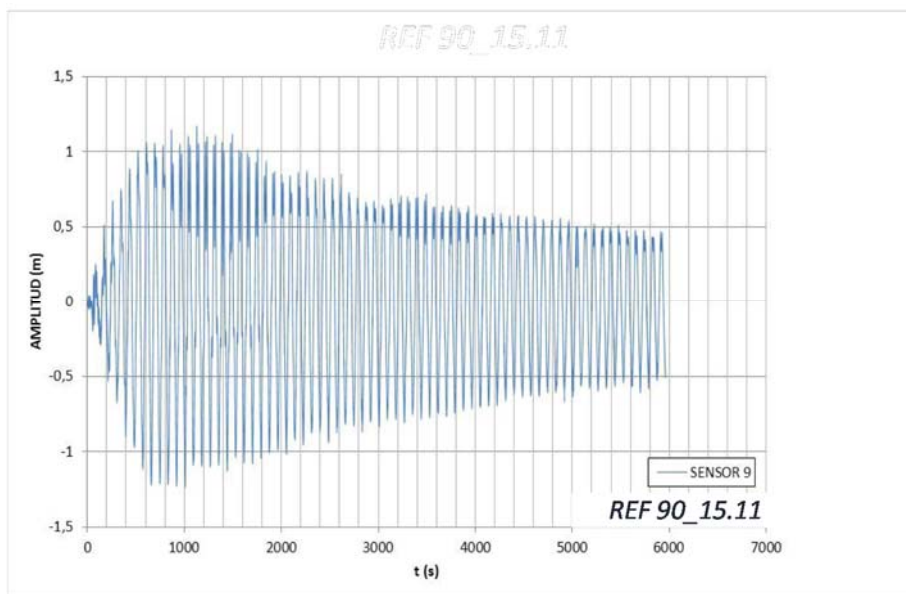


Figura V.26. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (REF, $T=90s$, sensor 9).

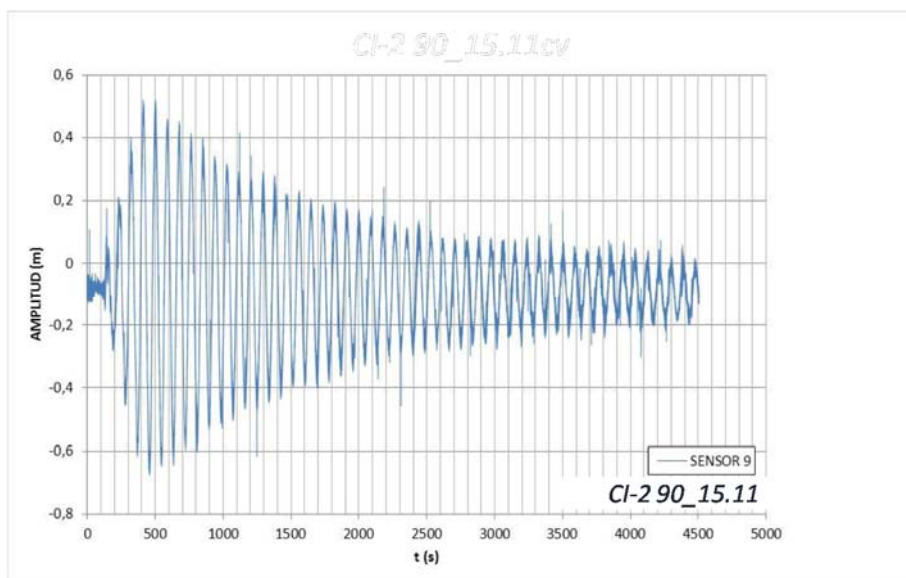


Figura V.27. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (ARJ-R-CI-2, $T=90s$, sensor 9).

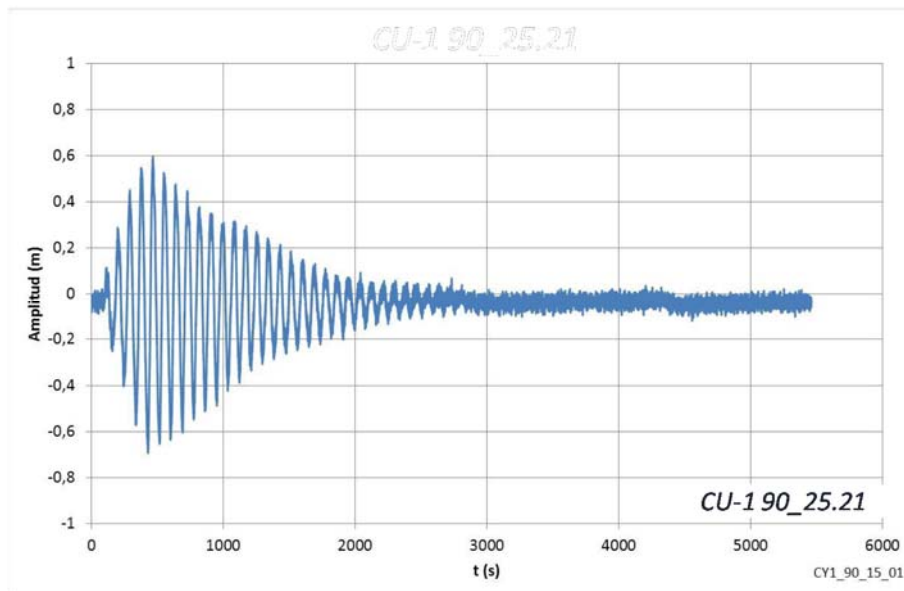


Figura V.28. Representación típica de las series temporales de desplazamiento de la superficie libre registrada en ensayos SRR (ARJ-R-CU-1, $T=90s$, sensor 9).

La amortiguación de las oscilaciones se produce con mayor rapidez en las estructuras ARJ-R merced a la capacidad disipativa de los circuitos largos, con mayor eficiencia en este caso para la estructura ARJ-CU-1. La mayor adecuación de la longitud de los circuitos, las pérdidas en el fluido por contracciones y turbulencias en la entrada y en el interior de los circuitos, así como el número de circuitos condiciona la respuesta disipativa de la estructura en los ensayos RSS. El conjunto de series temporales completa de los datos analizados (ver *Tabla V.3*) correspondientes al sensor 9 se reproduce íntegramente en el *Anejo 1*.

V.4.2. Resultados de la eficiencia de las estructuras ARJ-R

El análisis de las estructuras ARJ-R consiste básicamente en determinar el grado de amortiguación de la energía de las oscilaciones mediante *indicadores de eficiencia*, comparando el comportamiento de las diferentes estructuras en la fase de amortiguación de los ensayos SRR, con referencia a los resultados de una estructura de ataque de tipo convencional, completamente reflejante, sin disipación de energía.

Asimismo, el modelo exponencial descrito en el *apartado V.3* permite la estimación de indicadores de eficiencia para circuitos aislados, constituyendo una cota superior a la eficiencia de las estructuras ARJ-R formadas por conjuntos de circuitos disipativos.

A continuación, se exponen los resultados de la metodología de análisis de ensayos SRR descrita en el *apartado V.3* en relación a los indicadores de eficiencia:

- t_{50} .
- la energía disipada en una oscilación en el sistema $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$.
- el *coeficiente de reflexión*, Cr .
- *longitud efectiva de circuito*.

V.4.2.1. Obtención de la evolución de la energía en el tiempo y ajuste del modelo exponencial de disipación. Efectividad bruta.

La estimación de la energía de las oscilaciones se ha llevado a cabo mediante la función SIWEH²¹⁴ (Funke y Mansard, 1980) que proporciona un cálculo suavizado de la energía asociada en cada instante a partir de la serie temporal de desplazamientos de la superficie de agua registrada experimentalmente en los ensayos SRR.

Previamente al ajuste exponencial, se elimina la fase de acumulación en la serie, homogeneizando el origen de tiempos y normalizando la energía en el origen de la fase de amortiguación a un valor unitario (ver *apartado V.3.2*). A partir de t_{50} se obtiene la tasa exponencial de amortiguación bruta $2\cdot\beta_T$. La serie completa de gráficas incluyendo los ajustes exponenciales de la energía de las oscilaciones en la fase de amortiguación de los ensayos SRR se reproduce en el *Anejo 1*.

Los dos resultados que se pueden derivar directamente del ajuste exponencial de la evolución de la energía en la fase de amortiguación²¹⁵ son: el t_{50} y el módulo de disipación *bruto* $A_T=2\cdot\beta_T$ obtenida del ajuste exponencial de la energía de la fase de amortiguación de cada ensayo SRR (ver *Tablas V.5 y V.6*, respectivamente).

Tabla V.5. t_{50} (en segundos) de los ensayos SRR.

T[s]	1-REF	2-REF	CI-1	CU-1	CI-2	CU-2	CU-2 cur	CU-2 rug	CI-3	CU-3
45	903	865	477	440	203	204	191	281	206	160
90	2100	1848	693	388	533	471	502	448	730	780
135	2666		578							

Tabla V.6. Módulo de disipación $2\cdot\beta_T$ de los ensayos SRR.

T[s]	1-REF	2-REF	CI-1	CU-1	CI-2	CU-2	CU-2 cur	CU-2 rug	CI-3	CU-3
45	0.000770	0.000801	0.001450	0.001573	0.003420	0.003391	0.003630	0.002460	0.003600	0.004319
90	0.000330	0.000375	0.001000	0.001786	0.001300	0.001471	0.001381	0.001546	0.000950	0.000889
135	0.000260	-	0.001200	-	-	-	-	-	-	-

²¹⁴La función SIWEH se ha obtenido (CEDEX, 2011 y 2012) a partir del programa del mismo nombre disponible en el sistema GEDAP, mediante el cual se obtiene la función SIWEH (smoothed instantaneous wave energy history).

El GEDAP (www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/technology/experimentcontrol.html) es un sistema de análisis y gestión de datos que incluye funciones de adquisición y de control en tiempo real. Ha sido desarrollado por el *Canadian Hydraulics Centre del National Reserch Council de Canadá*.

²¹⁵Incluyendo todas las fuentes de disipación de energía en la dársena-canal.

La Fig. 29 muestra como los resultados obtenidos indican un mejor comportamiento general de las estructuras de más de 2 circuitos para los periodos resonantes ensayados, excepto para la estructura ARJ-R CU-1 ensayada con oscilaciones con $T=90$ s.

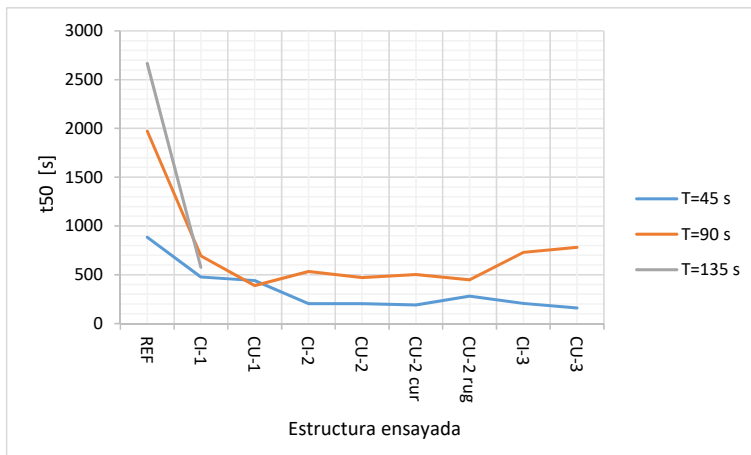


Figura V.29. Gráfica comparada de los valores de t_{50} para las diferentes estructuras analizadas.

V.4.2.2. Cancelación del efecto de la dársena-canal y de modelo. Efectividad neta de las estructuras ARJ-R.

Eliminando el efecto de la disipación por fricción en la dársena y por viscosidad en el seno del fluido (ver apartado V.3.1.1) y corrigiendo el resultado para adaptarlo a la eslora del cajón (ver apartado V.3.1.2) se obtiene el *módulo de disipación neto* $A=2\cdot\beta$ como indicador de la efectividad del cajón considerando exclusivamente el efecto de los circuitos disipativos. Los resultados (ver Tabla V.7 y Fig V.30) se expresan en función de la *módulo de disipación por oscilación neto* $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$ para representar la disipación de energía que tiene lugar en una oscilación completa como estimador de la efectividad de las estructuras ARJ-R ensayadas. Se incluye la columna REF que contiene la energía disipada en una oscilación por el sistema dársena-canal²¹⁶.

Tabla V.7. Energía disipada en una oscilación $2\cdot\beta\cdot T$ de los ensayos SRR.

$T[s]$	REF	CI-1	CU-1	CI-2	CU-2	CU-2 cur	CU-2 rug	CI-3	CU-3
45	0.040737	0.033795	0.040051	0.133985	0.132510	0.144665	0.085162	0.143140	0.179706
90	0.038143	0.065861	0.145810	0.096376	0.113769	0.104615	0.121398	0.060775	0.054571
135	0.000000	0.143419	-	-	-	-	-	-	-

²¹⁶Habitualmente no suele descontarse dicho efecto disipativo puesto que en las dársenas portuarias existe.

Se observa una mejor efectividad neta de las estructuras ARJ-R de circuitos largos para los periodos mayores y un claro dominio de las estructuras de circuitos cortos para los periodos de oscilación menores.

La tasa de amortiguación β aumenta con la frecuencia; a igual amplitud y menor periodo, mayores velocidades de fluido y mayores pérdidas por fricción. La excepción tiene lugar para las estructuras de circuitos muy largos, debido al menor número de circuitos y la posible excesiva longitud de los circuitos (mayor que la efectiva).

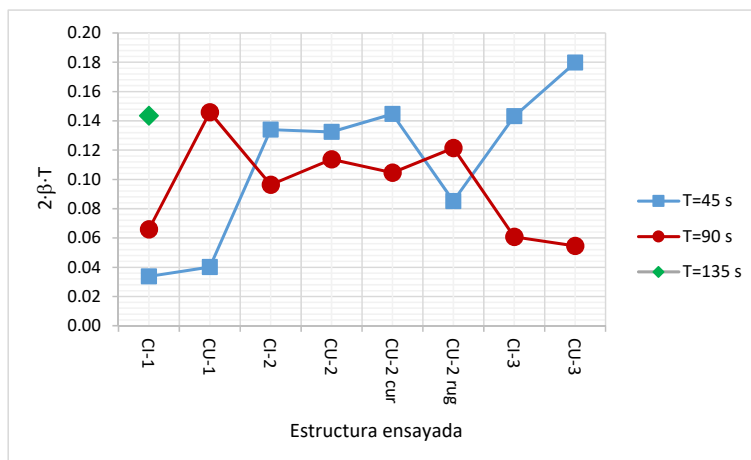


Figura V.30. Gráfica comparada de los valores de la energía disipada por oscilación neta para las estructuras antirreflejantes analizadas.

Las estructuras analizadas, exclusivamente por efecto de los circuitos pueden dispar hasta el 18% de la energía en cada oscilación (ARJ CU-3 para $T=45$ s), estando en la mayor parte de los casos en el rango de disipación de energía del 10%-14% por oscilación. Si se desea considera el efecto de la dársena-canal, la disipación se incrementará en un 4% aproximadamente (ver columna REF en *Tabla V.7*).

V.4.2.3. Reducción al circuito equivalente. Efectividad neta teórica máxima de los circuitos disipativos de las estructuras ARJ-R ensayadas.

El efecto disipativo independiente de los circuitos en una estructura ARJ-R determinada puede estimarse mediante aplicación de la metodología basada en el modelo exponencial (ver *apartado V.3.1.3*). La capacidad disipativa del circuito equivalente puede considerarse una cota superior de la efectividad de la estructura ARJ-R correspondiente al eliminarse el efecto de los paramentos verticales completamente reflejantes.

La disipación por circuito aislado (equivalente en caso de estructuras con circuitos de longitud distinta), se representa por la energía disipada en una oscilación por

circuito, $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$ en la *Tabla V.8* y mediante el coeficiente de reflexión (ver apartado V.3.1.4) en la *Fig. V.31*.

Tabla V.8. Energía disipada en una oscilación $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$ de los ensayos SRR en el circuito equivalente de las estructuras ARJ-R.

$T[s]$	CI-1	CU-1	CI-2	CU-2	CU-2 cur	CU-2 rug	CI-3	CU-3
45	0.260152	0.308306	0.515703	0.510027	0.556811	0.327783	0.367292	0.461122
90	0.506993	1.122431	0.370946	0.437893	0.402658	0.467255	0.155948	0.140027
135	1.104030	-	-	-	-	-	-	-

La tendencia observada es semejante a la obtenida para las correspondientes estructuras ARJ-R, aunque se observa una menor diferencia en general en el comportamiento de las estructuras con 4 y 6 circuitos. En éstas, el mayor número de circuitos se ve compensado por la menor eficacia en la disipación para los periodos de oscilación ensayados.

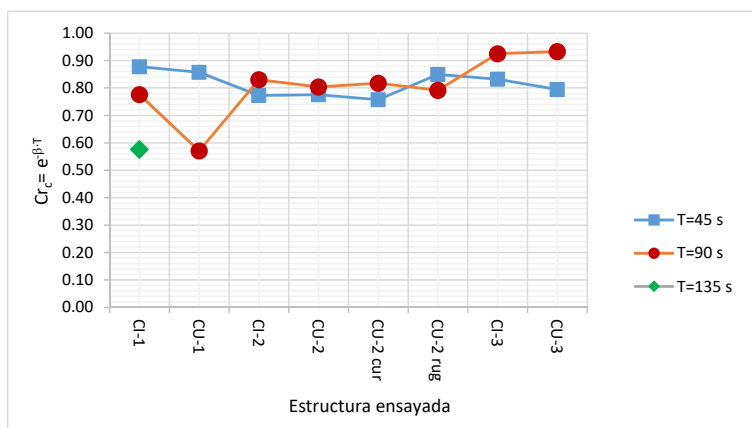


Figura V.31. Gráfica comparada de los valores del coeficiente de reflexión neto por circuito equivalente para las estructuras analizadas.

El coeficiente de reflexión neto por circuito puede considerarse una cota superior de la efectividad de las estructuras ARJ-R, puesto que cualquier estructura tendrá un porcentaje necesario²¹⁷ de tramos reflejantes sin aberturas en el frontal de la estructura. Como se aprecia en la *Fig. V.31*, los valores se encuentran, en general en el rango de valores 0.75-0.85 para el coeficiente de reflexión, excepto para los circuitos más largos en los que se alcanza un valor de 0.57.

²¹⁷Por razones constructivas, en cualquier caso y por razón de la longitud requerida de los circuitos para atenuar periodos largos.

V.4.2.4. Análisis de los registros gráficos. Estimación de la longitud eficaz de circuito.

El registro gráfico ha sido empleado para poder estimar visualmente la *longitud efectiva de los circuitos* Be_c para cada periodo de oscilación en los ensayos SRR (ver *Tabla V.5*). Ésta puede definirse como la longitud, siempre menor que la longitud del circuito, tal que el flujo de fluido en el circuito alcanza dicha longitud. Si parte final del circuito no se ve alcanzada por la perturbación que se introduce en el circuito como consecuencia de la oscilación exterior, dicha longitud se restará de la total del circuito para obtener la longitud efectiva del circuito. En la observación visual se distinguen dos fenómenos, el de evolución de la onda y el de aparición de turbulencias en los circuitos, obteniéndose la longitud efectiva de circuito como la máxima longitud en la que es observable claramente uno de los dos fenómenos. Si la longitud eficaz es inferior a la real del circuito, la longitud de dicho circuito está sobredimensionada para el correspondiente periodo. Como la capacidad disipativa de la estructura depende del número de circuitos, el diseño óptimo será el que disponga el mayor número de circuitos con de longitud igual a la longitud efectiva.

Tabla V.9. Estimación visual de la longitud efectiva de circuito (en rojo $Be_c < B_c$)²¹⁸.

ARJ-R de celdas circulares			T[s]			nombre
			45	90	135	
n	B_c^{CI} [m]	N	Be_c [m]	Be_c [m]	Be_c [m]	
23	80.5	2	45.0	15.0	30	ARJ-R-CI-1
10	35.0	2	30.0	17.3	-	ARJ-R-CI-2
13	45.5	2	30.0	17.0	-	
10	35.0	2	19.5	17.4	-	ARJ-R-CI-3
6.5	22.8	4	19.5	17.0	-	

ARJ-R de celdas cuadradas			T[s]			nombre
			45	90	135	
n	B_c^{CU} [m]	N	Be_c [m]	Be_c [m]	Be_c [m]	
42	100.8	2	60.0	100.8	-	ARJ-R-CU-1
18	43.2	2	52.5	52.5	-	ARJ-R-CU-2
24	57.6	2	52.5	52.5	-	
18	43.2	2	35.0	35.0	-	ARJ-R-CU-3
12	28.8	4	35.0	35.0	-	

n= nº de celdas por circuito

B_c^{CI} o B_c^{CU} circuito = longitud del circuito de celdas circulares (CI) o cuadradas (CU)

Be_c = longitud eficaz del circuito $\leq B_c^{CI}$ o B_c^{CU} circuito

N= nº de circuitos de cada tipo en la estructura

²¹⁸El valor de B_c es un valor promedio obtenido mediante medición geométrica de los circuitos de distinta longitud en una estructura ARJ-R. El valor Be_c se obtiene como el valor máximo para cualquier circuito de la estructura ARJ-R en el que se observa efecto de la oscilación en el circuito. Por lo tanto, puede que en algún caso sea mayor el observado que el teórico promedio.

El comportamiento hidrodinámico en el interior de las dos tipologías de cajones es muy distinto, pudiendo apreciarse su efecto en la *Tabla V.8*. La longitud efectiva tiene una tendencia creciente para los cajones de circuitos rectangulares, mientras que dicha tendencia parece ser la inversa, excepto para el caso de cajones de dos circuitos disipativos largos entre los periodos de 90 y 135 s.

Los cajones de circuitos rectangulares desarrollan un flujo turbulento, se alcanzan grandes velocidades lineales y se llega al final de los circuitos en todos los casos ensayados. La mayor velocidad de del flujo en el interior de los circuitos también se traduce en velocidades elevadas de entrada/salida como se muestra en la *Fig. V.32*.



Figura V.32. Imagen de la grabación del ensayo SRR correspondiente a la estructura ARJ-R-CU-2, con $T=90s$. Flujo vaciante a la salida de las cámaras.

Los cajones de celdas circulares desarrollan elevadas velocidades en unos tramos, mientras que en otros evolucionan movimientos circulares en los que, eventualmente, no se distingue un avance o retroceso claro de las partículas. La determinación de la longitud efectiva de circuito es más compleja. Mientras que la turbulencia es claramente observable, la evolución de la onda en los circuitos no es tan clara. La introducción de pequeños trazadores esféricos flotantes en los circuitos disipativos mejora la estimación en algunos casos (ver *Fig. V.33*).

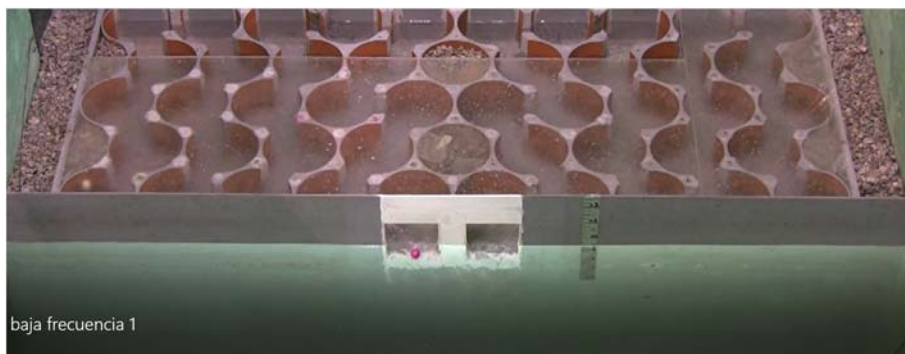


Figura V.33. Imagen de la grabación del ensayo SRR correspondiente a la estructura ARJ-R-CI-1, con $T=90s$ (se aprecia una de las esferas saliendo por la ventana izquierda en la fase vaciante).

La longitud efectiva de circuito introduce un nuevo punto de vista en el análisis de los resultados experimentales, destacándose dos efectos con influencia en la efectividad de estructuras y circuitos:

- La gran diferencia entre las longitudes efectivas y la geométrica para la otra sección con circuitos disipativos largos (ARJ-R CI-1) se muestra como la responsable de la menor eficiencia para los periodos mayores.
- La tasa de amortiguación neta β tiende a aumentar con la frecuencia; a la misma amplitud y menor periodo, mayores velocidades de fluido y mayores pérdidas por fricción. La excepción tiene lugar para las estructuras de circuitos muy largos, debido al menor número de circuitos y la excesiva longitud de los circuitos (mayor que la efectiva).

V.5. Modelo para la optimización de la eficiencia disipativa de estructuras ARJ-R

El presente apartado combina el modelo exponencial utilizado para el análisis de los resultados experimentales con los resultados experimentales obtenidos para la definición de un modelo para el diseño de estructuras ARJ-R óptimas para la disipación de ondas de baja frecuencia como las que tienen lugar en condiciones de resonancia en puertos. Finalmente, la disponibilidad de observaciones de longitud eficaz de circuito permite su incorporación al modelo de optimización pudiendo alcanzarse un mayor nivel de eficacia en el diseño de estructuras ARJ-R.

V.5.1. Optimización de estructuras ARJ-R a partir de la longitud óptima de circuito

El análisis de la efectividad de las estructuras ARJ en la atenuación del oleaje suele efectuarse relacionando el coeficiente de reflexión C_r , con la longitud del área de la cámara antirreflejante medida perpendicularmente al paramento frontal, respecto de la longitud de ola en las cámaras, B/L (ver *Capítulo III*).

La posibilidad de independizar los efectos de distintas fuentes disipativas mediante el modelo exponencial descrito en el *apartado V.3*, permite obtener indistintamente, tanto la energía disipada en una oscilación completa $2 \cdot \beta_c \cdot T$ como los coeficientes de reflexión en los circuitos equivalentes de las estructuras ARJ-R ensayadas. De forma análoga a la relación $C_r - B/L$ en las estructuras ARJ, la relación $C_{r,c} - B_c/L_c$ (el subíndice c indica referencia a un circuito o circuito equivalente de un conjunto de circuitos de una estructura ARJ) se presenta como elemento de diseño para la optimización de la longitud de los circuitos disipativos largos.

La *longitud óptima de circuito* para la mayor disipación de energía respecto del periodo resonante a atenuar se obtiene por comparación de los resultados de las relaciones estimadas del $C_{r,c}$ respecto de B_c/L_c correspondientes a los resultados experimentales, para el menor valor del coeficiente de reflexión. Así pues, los

circuitos con dicha longitud son los que más energía disipan en una de oscilación resonante²¹⁹. La estructura ARJ-R óptima para unas condiciones resonancia determinadas estará formada por la combinación del mayor número de circuitos con la longitud óptima.

La estimación de la respuesta disipativa de las estructuras ARJ-R óptimas diseñadas de acuerdo con lo anteriormente expuesto puede efectuarse mediante el concepto del *coeficiente de reflexión* (ver apartado V.3.3). La estructura óptima dispondrá N circuitos de longitud óptima, con $C_{r,c}$ conocido, que afectarán a un ancho de la estructura ARJ-R igual a $N \cdot a$ (siendo a el ancho de la abertura de cada circuito, supuesto idéntico para todos los circuitos) siendo el resto del paramento completamente reflejante.

Si los N circuitos son iguales, las pérdidas provocadas D (ver apartado V.3.1.2 y V.3.1.3) serán iguales, y si la anchura de las aberturas son iguales para todos los circuitos, entonces²²⁰:

$$\beta_+ = \beta_{c,+} \cdot \nu + 0 \quad (\text{V.19})$$

con β_+ el correspondiente a la estructura ARJ-R de N circuitos óptimos y $\beta_{c,+}$ el correspondiente al circuito óptimo estimado a partir su coeficiente de reflexión con la expresión:

$$\beta_{c,+} = \frac{-1}{2 \cdot T} \ln(C_{r,c}^2) \quad (\text{V.20})$$

con lo que el coeficiente de reflexión quedará:

$$C_{r,+} = e^{\beta_+ \cdot T} \quad (\text{V.21})$$

V.5.2. Introducción de la longitud eficaz de circuito en el modelo de optimización

El análisis del parámetro de la longitud relativa de circuito,²²¹ B_c/L_c , permite establecer el criterio de longitud óptima de circuito como aquel con menor coeficiente de reflexión para el rango de valores ensayados²²². Corrigiendo la longitud relativa de circuito con la longitud efectiva estimada mediante observación visual, el efecto disipativo del circuito será el mismo y por lo tanto el coeficiente de reflexión no variará. Sin embargo, si los circuitos óptimos son más cortos ($B_{e_c} < B_c$) podrán incorporarse en mayor número, optimizándose la efectividad de la estructura ARJ-R.

²¹⁹La longitud geométrica de los circuitos puede corregirse si existen observaciones u otros medios para determinar la longitud efectiva de circuito, puesto que el circuito no disipará más energía para un determinado periodo resonante aunque tenga mayor longitud.

²²⁰Suponiendo independencia entre D/E y n (ver apartado V.3).

²²¹Por extensión del concepto de ancho relativo (B/L) de la cámara antirreflejante habitualmente utilizado en las estructuras ARJ para la atenuación de oleaje.

²²²Los valores de B_c se corresponden con la medición geométrica obtenida longitudinalmente.

V.6. Aplicación del modelo de optimización del diseño de estructuras antirreflejantes para la atenuación de ondas largas

La aplicación del modelo de diseño óptimo de estructuras ARJ-R a partir de los resultados experimentales permite obtener la longitud de circuito óptimo para cada tipología de circuito ensayada adaptada a las condiciones de la onda de baja frecuencia. A partir de la longitud de circuito óptima, la metodología descrita en el apartado V.5 basada en el modelo exponencial permite la obtención de diseños eficientes óptimos para la atenuación de ondas largas.

V.6.1. Longitud de circuito óptimo corregido con la longitud eficaz

La relación entre los coeficientes de reflexión de los circuitos equivalentes correspondientes a las estructuras ARJ-R ensayadas y la longitud relativa de circuito B_c/L_c , se representa en la Fig. V.34 para las dos tipologías ARJ-R CI y ARJ-R CU, de circuitos de celdas circulares y cuadradas respectivamente. Se han unido los puntos con los valores más reducidos del coeficiente de reflexión neto por circuito para cada tipología, estableciéndose el criterio de longitud óptima de circuito para cada tipología como aquel con menor coeficiente de reflexión para el rango de valores ensayados.

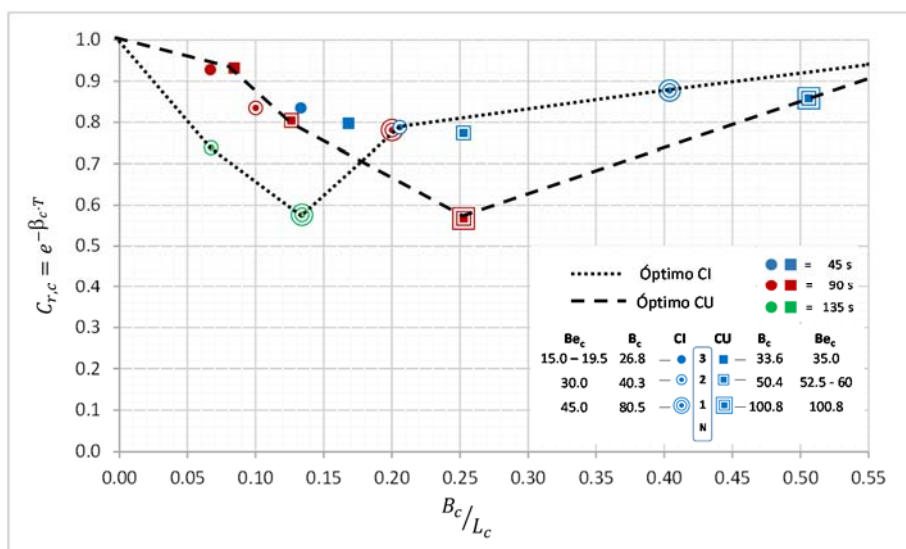


Figura V.34. Coeficiente de reflexión por circuito frente a la longitud relativa de los circuitos disipativos por tipología.

Los valores de longitud relativa óptimos se obtienen para los ensayos de circuitos más largos en los que las estructuras ensayadas obtienen la mayor eficiencia neta por circuito. Asimismo se destaca la relevancia de la tipología de celda, con mayor disipación de energía en el interior de los circuitos de celdas circulares, que desplaza los valores óptimos de la longitud óptima relativa hacia valores notablemente inferiores a los correspondientes a la tipología de circuitos rectangulares. Este efecto permite disponer de circuitos más cortos en las estructuras ARJ-R CI para absorber ondas más largas que los ARJ-R CU, pudiendo incorporar más circuitos en el diseño y por lo tanto ser más eficientes.

Corrigiendo la longitud relativa de circuito con la longitud efectiva estimada mediante observación visual, se mantienen las tendencias expuestas con la salvedad de un mayor desplazamiento hacia valores menores de Be_c/L_c en el óptimo de la tipología ARJ-R CI, incrementando la posibilidad de incorporar aún más circuitos en las estructuras ARJ-R de celdas circulares.

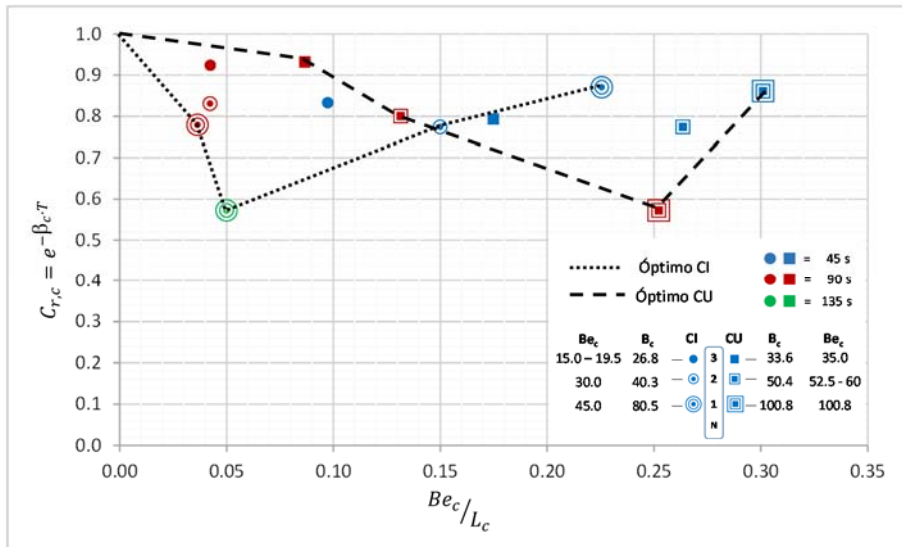


Figura V.35. Coeficiente de reflexión neto por circuito frente a la longitud efectiva relativa de los circuitos disipativos.

Los resultados medidos del coeficiente de reflexión medidos serían los mismos que se obtendrían para una longitud de circuito disipativo igual a la efectiva. El desplazamiento del punto de diseño para una misma longitud de onda indica una relación de longitud óptima de circuitos para las estructuras ARJ-R CI respecto de las CU de 1/5:

$$\frac{Be_c^{CI}}{Be_c^{CS}} = \frac{1}{5} \tag{V.21}$$

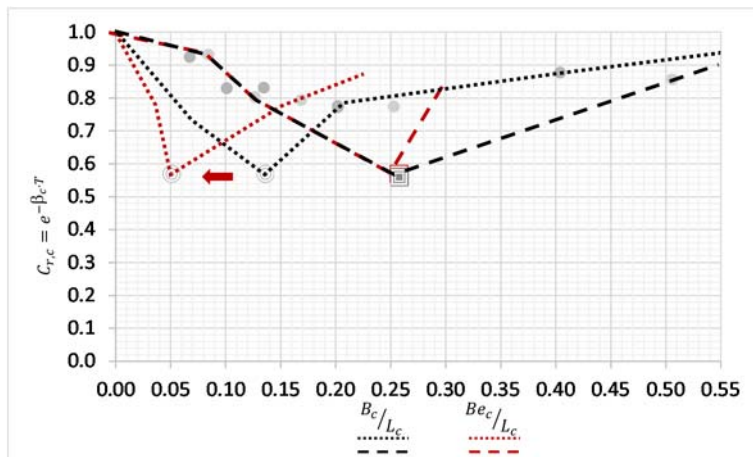


Figura V.36. Gráfica comparativa de los valores del coeficiente de reflexión neto por circuito empleando la longitud relativa geométrica o efectiva de los circuitos disipativos.

El valor óptimo de la tipología ARJ-R CU se sitúa próximo al óptimo teórico para estructuras ARJ expuestas a oleaje (ver *Capítulo III*), mientras que la mayor disipación y diferencia en el comportamiento hidrodinámico del flujo interior del circuito de celdas circulares provoca una mayor diferencia hacia las ondas más largas. La tendencia observada en la tipología ARJ-R CI de formar flujos circulares, en la que la longitud efectiva de circuito estimada decrece con el periodo requiere una mayor investigación.

V.6.2. Estructuras ARJ-R óptimas

Los criterios de diseño óptimo de una estructura ARJ-R como las analizadas dependerá de:

- el coeficiente de reflexión neto de los circuitos.
- la longitud de los circuitos por tipología de celdas en relación al óptimo.
- el número de circuitos en la estructura.

con lo que el mejor diseño será el que cuente con el mayor número de circuitos con el menor coeficiente de reflexión y de longitud igual a la óptima efectiva.

La mejor distribución de circuitos para el cajón tipo utilizado en la presente investigación se obtiene con el *modelo de diseño óptimo* (ver *apartado V.5*) a partir de la estimación de la *longitud óptima de circuito*, incorporando la corrección de la longitud eficaz de circuito, en función de la tipología de la estructura ARJ-R y de las características de la longitud de onda en el interior de los circuitos.

Los resultados de la *Fig. V. 36* indican el óptimo de la longitud efectiva relativa de circuitos en 0.05 para la tipología ARJ-R CI y en 0.25 para la tipología ARJ-R CU, con

un coeficiente de reflexión de 0.58 y 0.57, respectivamente. El diseño óptimo para el cajón tipo de dimensiones 36.95m x 15.70m x 17.00m (eslora x manga x puntal), con calado en el interior de los circuitos $d_c[m]=2$, diámetro de celdas circulares $\phi_c[m]=3.5$, lado de las celdas cuadradas $\ell_{y,c}[m]=2$ tamaño de la abertura en el paramento frontal de $a[m]=2.4$, se muestra en la *Tabla V.10*.

Tabla V.10. Obtención del coeficiente de reflexión para los diseños óptimos de estructuras ARJ-R para $T[s]=45, 90$ y 135 .

	Tipología					
	CI (celdas circulares)			CU (celdas cuadradas)		
$(Be_c / L_c)_+$	0.05			0.25		
$C_{r,c+}$	0.58			0.57		
$\beta_{c,+}$	0.01211	0.00605	0.00404	0.01249	0.00625	0.00416
$T[s]$	45	90	135	45	90	135
Be_{c+}	9.96	19.92	29.88	49.81	99.61	149.42
$N_{máx,teo}$	8.0	8.0	5.4	4.1	2.0	1.4
%celdas	49%	99%	100%	100%	100%	100%
$\ell_{x,teo} [m]$	7.8	15.5	15.7	15.7	15.7	15.7
β_+	0.00629	0.00315	0.00141	0.00329	0.00082	0.00037
$C_{r,+}$	0.75	0.75	0.83	0.86	0.93	0.95

$(Be_c / L_c)_+$ = ancho relativo óptimo basado en la longitud eficaz de circuito

$C_{r,c+}$ = Coeficiente de reflexión del circuito equivalente óptimo

$\beta_{c,+}$ = coeficiente exponencial para el circuito óptimo

$T[s]$ = periodo de la oscilación resonante

Be_{c+} = longitud eficaz del circuito óptimo

$N_{máx,teo}$ = número máximo teórico de circuitos de longitud Be_{c+} en la estructura ARJ-R

%celdas = porcentaje de celdas ocupadas por los circuitos en la estructura ARJ-R

$\ell_{x,teo} [m]$ = ancho teórico de la estructura ocupado por los circuitos disipativos

β_+ = coeficiente disipativo exponencial óptimo asociado a la estructura ARJ-R óptima

$C_{r,+}$ = coeficiente de reflexión de la estructura ARJ-R óptima

La *Tabla V.10* muestra los resultados teóricos del proceso de aplicación del modelo de optimización de estructuras ARJ-R para $T=45s, 90s$, y $135 s$, a partir de los datos experimentales²²³.

Debido a la alta dependencia del $C_{r,+}$ con Be_c/L_c , la reducida base experimental²²⁴ y la imprecisión en la estimación de la longitud eficaz, los valores del coeficiente de

²²³Las celdas coloreadas indican que no se han utilizado todas las celdas del cajón.

²²⁴Lo reducido de la base experimental obliga a utilizar valores del Be_c y del Be_{c+} promedio o equivalente para una estructura ARJ-R con un conjunto de circuitos de distintas longitudes. Debe tenerse en cuenta que la respuesta de una estructura ARJ-R con todos los circuitos de idéntica longitud no será la misma que la de una estructura ARJ-R con circuitos de distinta longitud cuyo Be_c sea igual al anterior, debido a la elevada dependencia del parámetro Be_c/L_c .

reflexión obtenidos deben considerarse una cota superior teórica que se alcanzaría con una precisa estimación de la longitud eficaz y en el caso en que la dinámica de los circuitos de celdas circulares sea compatible con la longitud óptima teórica estimada para el periodo de la oscilación a atenuar.

Por otra parte, debe considerarse que el coeficiente de reflexión estimado de la estructura óptima incluye únicamente los efectos disipativos de los circuitos incorporados en las estructuras ARJ-R. El efecto de la dársena-canal supone un 4% adicional en el coeficiente de reflexión, de acuerdo a los experimentos efectuados en la presente investigación. Puede concluirse que los diseños efectuados con el modelo de optimización de estructuras ARJ-R permiten alcanzar niveles teóricos de disipación adecuados para la atenuación de la resonancia en puertos, con niveles similares a los indicados en la literatura científica para otras estructuras propuestas para la atenuación de ondas largas, pero con la ventaja de poder integrarse en una estructura para ser utilizada como obra de atraque y sin reducción del área marítima interior del puerto.

González-Escrivá et al (2017) muestra mediante aplicación del modelo numérico MSP (Behrendt, 1985) aplicado a un puerto real, como la incorporación de algunos tramos ARJ-R para absorción de la energía de la onda larga mejoran significativamente la problemática encontrada (ver Fig. V.37).

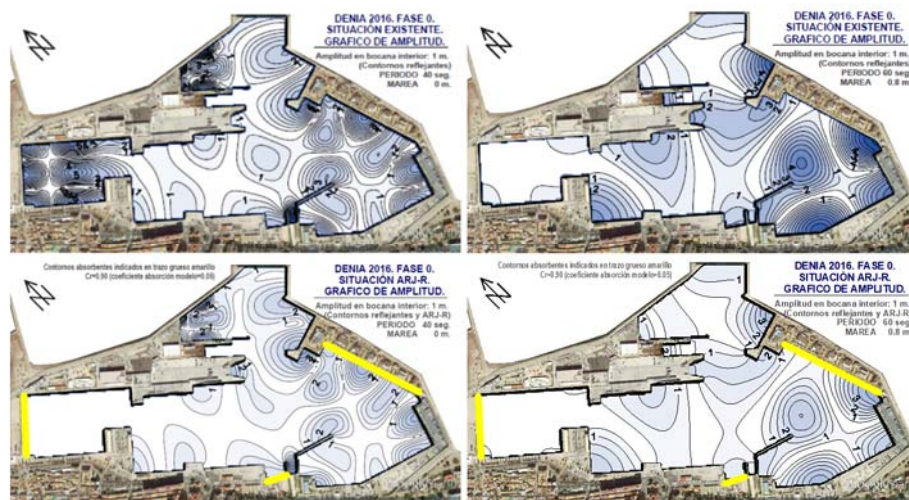


Figura V.37. Resultados de la respuesta de un puerto real a oscilaciones resonantes correspondientes a $T[s] = 40$ (izquierda) y $T[s] = 60$ (derecha) sin elementos que absorban la onda larga (gráficos en la parte superior) y con estructuras ARJ-R (dispuestas en los tramos marcados en trazo grueso de color amarillo) con coeficiente de reflexión $C_R=0.9$ (gráficas en la parte inferior).

Futuras investigaciones que aporten un mayor número de datos, una estimación más precisa de la longitud eficaz de los circuitos, así como un estudio de la dinámica de los circuitos de celdas circulares permitirán mejorar la estimación del diseño óptimo.

V.7. Resumen y conclusiones del capítulo V

La modelización física a escala de la interacción onda-estructura para la cuantificación de la eficiencia en la amortiguación de las ondas largas se justifica en base a los complejos mecanismos disipativos de las estructuras ARJ. Por otra parte, las incertidumbres en la aplicabilidad de los procedimientos experimentales habituales motiva la definición de una metodología específica (MESRR) para el estudio de las ARJ-R.

La nueva MESRR está basada en la acumulación de energía por generación de oleaje de largo periodo de duración acotada en el sistema estanco dársena-canal de ensayos limitado en un extremo por la pala generadora de oleaje y en el otro extremo por la estructura antirreflejante a ensayar. La experimentación llevada a cabo a escala 1/11.6, reproduce el proceso de resonancia unidimensional en una dársena rectangular estrecha cerrada en la que todos los contornos son reflejantes excepto en un extremo en el que se emplaza la estructura ARJ-R, que es disipativo.

La metodología utilizada requiere un procedimiento de análisis específico, que se fundamenta en la definición de un modelo exponencial en la fase de amortiguación de los ensayos de simulación de respuesta resonante (SRR). A partir de los registros experimentales, incluyendo observaciones visuales que permiten estimar la *longitud eficaz de circuito*, Be_c , se analiza la efectividad de las estructuras ARJ-R propuestas en el capítulo anterior para la atenuación de la resonancia en puertos. Los índices de efectividad obtenidos se basan en el concepto de módulo de disipación en una oscilación equivalente a la energía relativa disipada en una oscilación aplicado a las estructuras antirreflejantes y a los circuitos independientemente.

Por último, la extensión de la metodología de análisis aplicada a un modelo de diseño óptimo de estructuras ARJ-R de las tipologías ensayadas permite la obtención teórica con base experimental del coeficiente de reflexión de las estructuras óptimas para la atenuación de resonancia en puertos. La obtención del coeficiente de reflexión permite la comparación con otras propuestas expuestas en la literatura científica. Futuras investigaciones para la mejora de la precisión en el diseño óptimo de las estructuras ARJ-R deberán dirigirse tanto a la mejora en la obtención de la longitud eficaz de circuito como al estudio del comportamiento hidrodinámico de los circuitos de celdas circulares dada su potencialidad para incluir un mayor número de circuitos en una misma estructura ARJ-R respecto de los circuitos rectangulares, y por lo tanto para disipar más energía de oscilaciones resonantes.

Puede concluirse que los diseños de estructuras ARJ-R basados en el planteamiento de la extensión de los mecanismos disipativos de las estructuras ARJ a las atenuación de las oscilaciones resonantes disponen de la capacidad teórica para alcanzar niveles

de disipación adecuados con la ventaja de poder integrarse en una estructura con funcionalidad completa de obra de atraque y sin merma del espacio marítimo de operación portuario.

CAPÍTULO VI

Conclusiones

Ω

Be_c

T

H

t_{50}

C_r

β

VI.1. Síntesis y conclusiones.

La Tesis Doctoral que se presenta es el resultado de la participación activa en los proyectos de investigación:

- *Estudio de Muelles y Diques Verticales Antirreflejantes (Ref: REN2002-02951), “MUDIVAR” (2002-05).* Tipo: Proyectos de investigación. Financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- *Estudio del Rebase y la Estabilidad de Diques Verticales Antirreflejantes (Ref: TRA2006-11114), “REDIVAR” (2006-09).* Tipo: Proyectos de investigación 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 Anti Reflejantes (Ref: P11/08), “CADIMA” (2009-2012).* Tipo: I+D contratada/convenida. Financiación: Construcciones y Estudios, S. A.

y la reflexión sobre las condiciones de seguridad y operatividad portuaria frente a la resonancia de ondas de baja frecuencia y su amplificación progresiva²²⁵.

Del análisis de los mecanismos de generación de las ondas largas y las observaciones del fenómeno de la resonancia que se citan en la literatura científica, destaca la importancia de los procesos asociados a las denominadas *ondas de infragravedad*²²⁶ ($30 < T[s] < 300$), generadas por grupos de olas y otras causas, que se manifiestan en forma de onda estacionaria cuando tiene lugar la resonancia en dársenas portuarias y bahías. Sin embargo, la predicción de las ondas de infragravedad a partir de los datos de oleaje requiere la medición en prototipo.

Por otra parte, el estudio de los métodos y modelos para la determinación de la respuesta resonante en puertos y dársenas corrobora el acoplamiento de las longitudes de onda ($100 < L[m] < 5000$) a los modos naturales de oscilación típicos de la mayoría de puertos, resaltando el papel de los mecanismos disipativos en la estimación realista del factor de amplificación. La revisión de los métodos analíticos resalta la simplicidad y utilidad del *modelo exponencial de atenuación* y la *tasa de*

²²⁵La incidencia del cambio climático en la resonancia por ondas largas en los puertos no está claramente definida. Sin embargo, las expresiones existentes en la literatura científica muestran proporcionalidad entre la altura de la onda de infragravedad con la altura del oleaje que lo genera. Por lo tanto, es de esperar que el incremento pronosticado en los informes del IPPC empeore las condiciones de operatividad portuaria por resonancia de onda larga. (Tanaka et al, 2014).

²²⁶Se ha decidido emplear término *ondas de infragravedad* por ser el más habitualmente utilizado aunque recientemente se ha discutido en el foro electrónico *Coastal List** como poco apropiado para describir estas ondas de baja frecuencia de periodos comprendidos entre 30 y 300 s, (el límite superior es variable según las referencias, siendo incluso definido más vagamente en relación a *unos pocos* minutos).

(* *Coastal_list* es un foro moderado con más de 1700 suscripciones de ingenieros de puertos y costas que emplea el correo electrónico como vía de comunicación. Fue puesto en funcionamiento el 28 de septiembre de 1995 por el profesor R. Dalrymple del Center for Applied Coastal Research en la University of Delaware.

amortiguación β como parámetro fundamental del sistema disipador de energía, acotando la amplitud máxima de las oscilaciones forzadas, y determinante del tiempo necesario para la reducción de las oscilaciones libres a un nivel aceptable de operatividad una vez haya cesado la causa que inició el proceso resonante. Sin embargo, la estimación de los complejos fenómenos disipativos que se sintetizan en la tasa de amortiguación no es sencilla, siendo todavía imprescindible la modelización física a escala. La revisión del estado del arte en relación a las estructuras antirreflejantes junto con la experiencia acumulada en los proyectos de investigación destaca los mecanismos disipativos de rotura, fricción y turbulencia, resaltando el papel de la disipación por interferencia de ondas, característico de las estructuras antirreflejantes tipo Jarlan (ARJ).

Las estructuras ARJ son estructuras marítimas verticales con el panel frontal perforado y el panel posterior trasero impermeable. Puede demostrarse analíticamente en el caso ideal que este mecanismo de disipación por interferencia de ondas presenta su óptimo cuando la distancia entre el panel frontal y la pared reflejante B , es la cuarta parte de la longitud de onda $B=L/4$, mientras que los resultados experimentales registran valores inferiores, en el rango $L/10 < B < L/5$. Así pues, las estructuras ARJ convencionales se muestran ineficaces para la atenuación de ondas de baja frecuencia que requieren anchos excesivos.

Por otra parte, el estudio detallado de las escasas estructuras existentes para la atenuación de onda larga expone la dificultad en la disipación de las ondas largas, desaconsejándose habitualmente su instalación en el interior de las dársenas portuarias debido a la elevada necesidad de espacio marítimo y su difícil adaptación a la funcionalidad de atraque.

El análisis del estado del arte constata la carencia de estructuras antirreflejantes que constituyan soluciones viables económica y constructivamente, y efectivas para mejorar las condiciones de seguridad y operatividad portuaria frente a la resonancia de onda de baja frecuencia en puertos.

VI.1.1. Nuevo concepto: circuitos, estructuras ARJ-R de circuitos disipativos largos para atenuar oscilaciones resonantes en puertos.

En respuesta a la problemática planteada, González-Escrivá y Medina (2012) presentan una nueva estructura marítima para muelles y diques, constructiva y económicamente viable (Martínez et al., 2010) con cámaras de unidades múltiples basada en el concepto de circuito (González-Escrivá, 2011; y Medina et al., 2016) para la atenuación de ondas de infragravedad. Un *circuito* en una estructura ARJ es el espacio o la trayectoria recorrida por el flujo del oleaje a través de una cámara de disipación, desde su incidencia hasta su disipación o salida del sistema de atenuación, en función de las características geométricas de la cámara.

Específicamente para la atenuación de la resonancia en puertos, *el concepto de circuito permite extender los mecanismos de disipación de las estructuras ARJ a las ondas de baja frecuencia mediante la incorporación de circuitos disipativos o antirreflejantes de unidades múltiples de gran longitud (estructura ARJ-R)*. 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 baja frecuencia.

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 de cajones de celdas aligeradas, permite adaptarse a las condiciones locales del oleaje y las ondas largas que inciden sobre la estructura, pudiéndose realizar diseños óptimos específicos adaptados a las condiciones locales de cada tramo de obra. Así pues, los cajones utilizados en los muelles más expuestos al oleaje 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 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.

VI.1.2. Nueva metodología experimental: MESRR.

La complejidad de los mecanismos disipativos de las estructuras ARJ-R en la atenuación de onda larga, requiere de la experimentación física a escala para la determinación de su efectividad antirreflejante. Sin embargo, el análisis de los ensayos descritos en la literatura científica de estructuras propuestas para la atenuación de ondas de baja frecuencia, constata una serie de incertidumbres asociadas a: 1) la generación de ondas largas con medios mecánicos, 2) el empleo de técnicas numéricas de separación de oleaje incidente y reflejado, 3) la variabilidad del nivel medio, 4) efectos de escala y de modelo.

Para incrementar la fiabilidad de la estimación de las nuevas estructuras ARJ-R se define una *metodología experimental nueva basada en la simulación de las condiciones resonantes (MESRR)*.

Básicamente, la metodología MESRR consiste en aprovechar la geometría de un canal de ensayos 2D, semejante a una dársena rectangular estrecha aislada, en la que la estructura ARJ-R se dispondrá en el extremo opuesto al generador, sirviéndose de las inevitables multirreflexiones que se producirán para simular las condiciones de resonancia. En los experimentos, la dársena rectangular estrecha cerrada quedará constituida por el tramo de canal de ensayos entre la pala generadora de oleaje (que

deberá ser estanca) y el modelo del elemento disipativo, en este caso, las estructuras ARJ-R (cuya sección también deberá ser estanca).

Los ensayos basados en la MESRR constarán de dos fases: una primera *fase de acumulación* de energía provocada por acción de oscilaciones generadas con frecuencias próximas a la resonante de la dársena-canal, y una segunda *fase de amortiguación* en la que el generador se detiene y los mecanismos disipativos atenúan las oscilaciones. La estimación experimental directa de la eficacia antirreflejante se obtiene por comparación de los ensayos con estructuras ARJ-R respecto del ensayo con paramento completamente reflejante.

En la presente investigación, se describe el empleo satisfactorio de la MESRR aplicada a ensayos de gran escala 1/11.6 debidamente justificada para evitar los posibles efectos de escala derivados de las fuerzas viscosas. Se ensayaron 6 estructuras ARJ-R de 2, 4 y 6 circuitos disipativos largos constituidos por la interconexión de celdas entre sí, circulares o cuadradas, en distintas direcciones de mayor longitud que el ancho de la estructura y abiertos al exterior a través de ventanas en el paramento frontal, para la atenuación de oscilaciones resonantes con periodos entre $30 < T[s] < 300$. Se obtuvo una amortiguación relevante de las oscilaciones registradas en el tiempo respecto de los ensayos con estructura completamente reflejante.

Además, se realizaron observaciones visuales para estimar *longitudes eficaces de circuito* Be_c , un concepto aplicable a circuitos disipativos largos, definido como la longitud del circuito susceptible de producir efectos disipativos. Los circuitos con Be_c inferior a la longitud geométrica medida a lo largo del sentido de avance del flujo en el circuito B , estarán sobredimensionados para absorber la energía de una oscilación con periodo determinado. El número de circuitos sobredimensionados y la relación entre Be_c y B , serán un índice directo de la efectividad de la estructura ARJ-R.

VI.1.3. Nueva metodología de análisis basada en el modelo exponencial de amortiguación de las oscilaciones.

La simulación de las condiciones resonantes (SRR) en una dársena aislada rectangular estrecha como resultado de aplicación de la nueva metodología a la experimentación física a escala permite el ajuste de un *modelo exponencial* de disipación de la energía de las oscilaciones en la fase de amortiguación de los ensayos. El modelo se basa en la módulo de disipación por oscilación $2 \cdot \beta \cdot T$, que representa la pérdida relativa de energía por cualquier fuente en una oscilación completa. La proporcionalidad entre la energía y el cuadrado de las amplitudes de las oscilaciones permite establecer relaciones en términos de disipación de energía o en términos del coeficiente de reflexión, pudiendo efectuar comparaciones con resultados obtenidos con otros procedimientos.

$$C_r = \frac{H(t+T)}{H(t)} = \sqrt{\frac{E(t+T)}{E(t)}} = e^{-\beta T} \quad (\text{VI.1})$$

Se han obtenido muy buenos ajustes exponenciales a las series temporales de evolución de la energía en la fase de amortiguación estimadas a partir de las series temporales de desplazamientos de la superficie libre registradas en los ensayos. La de la evolución de la energía se ha estimado de forma satisfactoria a partir del uso de la función SIWEH (Funke y Mansard, 1980).

El análisis de la efectividad antirreflejante se efectúa a partir de la obtención de los siguientes indicadores de eficiencia:

- t_{50} , definido como el tiempo observado para reducir la energía a la mitad, calculado a partir de la estimación de la evolución de la energía en el dominio del tiempo.
- El módulo de disipación por oscilación $\Omega=2\cdot\beta\cdot T$, relacionada con la disipación de energía relativa en un ciclo de oscilación.
- Los coeficientes de reflexión de las estructuras antirreflejantes, C_r y de los circuitos disipativos individualmente estimados, $C_{r,c}$.
- *Longitud efectiva de circuito* Be_c estimada visualmente a partir de los registros en vídeo realizados en los ensayos SRR, como la longitud que alcanza la oscilación en el circuito para los periodos ensayados.
- El coeficiente de reflexión estimado para las estructuras ARJ-R optimizadas, C_{r+} .

El modelo exponencial permite la estimación de la capacidad disipativa de la estructura sin incluir el efecto de la disipación por fricción en los contornos del canal ni la interna en el seno del fluido, representada por una función exponencial cuya tasa de amortiguación es la diferencia entre la tasa de la estructura ARJ-R y la tasa de la estructura completamente reflejante de referencia.

$$\beta_{ARJ-R}^* = \beta_T^* - \beta_{REF}^* \quad (VI.2)$$

Asimismo, el modelo permite aislar la respuesta disipativa de los circuitos respecto del resto de ancho no disipativo de la estructura ARJ-R mediante una función exponencial de tasa de amortiguación β igual a la tasa de la estructura ARJ completa dividido por la relación de abertura ν :

$$\beta_{ARJ-R} = \frac{\beta_{ARJ-R}}{\nu} \quad (V.17)$$

En el que cada circuito, o conjunto de circuitos tendrá la misma tasa de amortiguación, que para el caso de un conjunto de circuitos de distinta longitud se corresponderá con la tasa de amortiguación equivalente.

La aplicación del modelo exponencial a los ensayos con la MESRR descritos en la presente investigación permite estimar una disipación de hasta el 18% de la energía en cada oscilación y una reducción del t_{50} de hasta 5.5 veces respecto a la estructura completamente reflejante. El menor coeficiente de reflexión estimado para los circuitos de las estructuras ensayadas ha sido de 0.57.

VI.1.4. Nueva metodología de diseño óptimo para las estructuras ARJ-R.

La combinación del modelo exponencial basado en la tasa de amortiguación β y la relación de los resultados experimentales entre el coeficiente de reflexión C_r y el longitud relativa de los circuitos B_c/L_c , permite definir una nueva metodología teórico-experimental de diseño para las estructuras ARJ-R para la atenuación de resonancia (ARJ-R) en puertos. Estimando el óptimo de diseño de longitud de circuito de un determinado tipo en base a la relación de la longitud relativa de los circuitos asociada al mínimo coeficiente de reflexión, la estructura óptima será la que disponga del mayor número de circuitos óptimos. A partir del diseño incluyendo el número de circuitos, la relación de abertura en el paramento frontal y el coeficiente de reflexión de los circuitos puede estimarse el coeficiente de reflexión de la estructura ARJ-R completa con uso del modelo exponencial basado en la tasa de amortiguación descrito anteriormente.

La determinación experimental visual de la longitud eficaz de circuito permite optimizar la longitud de circuito óptima y en consecuencia el diseño óptimo de la estructura ARJ-R, mediante la incorporación de la relación Be_c/L_c a la metodología de diseño óptima en sustitución de B_c/L_c . La aplicación de la metodología expuesta a estructuras ARJ-R como las ensayadas permite obtener diseños con coeficientes de reflexión de 0.75.

VI.1.5. Diferencias entre circuitos rectangulares y de celdas circulares.

Las estructuras ARJ-R diseñadas han partido de la base de estructuras verticales de cajones de celdas cuadradas y circulares. La experimentación efectuada muestra diferencias notables en la hidrodinámica de los circuitos en función de la tipología de las celdas. Mientras que los circuitos rectangulares alcanzan elevadas velocidades incrementándose la longitud eficaz con el periodo de las ondas, en el caso de los circuitos de celdas circulares, se observa que la longitud eficaz puede incluso disminuir con el periodo de las ondas, probablemente como consecuencia de la aparición de dinámicas de rotación en las celdas que incrementan la disipación.

Como resultado interesante cabe destacar que, aunque el análisis de los resultados experimentales muestra capacidades de disipación similares, la menor longitud eficaz para los circuitos de celdas circulares (en relación de 5 a 1 respecto de los circuitos rectangulares) apunta a que los diseños más eficientes empleando estructuras ARJ-R de celdas circulares en los que podrán incorporarse mayor número de circuitos.

VI.2. Líneas de investigación futuras.

La investigación desarrollada en la presente Tesis Doctoral marca el inicio para nuevas líneas de investigación que se lleven a cabo partiendo de alguno de los resultados de la misma o perfeccionando alguno de los aspectos aún por resolver. A continuación se indican algunos de los posibles:

- En general, al disponer de los datos experimentales de la presente investigación para calibración, puede plantearse el desarrollo de modelos numéricos de simulación de estructuras o circuitos similares a los ensayados. Específicamente:
 - El desarrollo de un modelo numérico que permita la simulación de los flujos en los circuitos de forma aislada con estimación de su respuesta resonante puede utilizar los resultados de los datos experimentales expuestos para su calibración y emplear el modelo exponencial descrito para diseñar estructuras ARJ-R y estimar el coeficiente de reflexión de la estructura. Dicho modelo numérico podría investigar el comportamiento de los circuitos de celdas circulares con mayor detalle u otras formas, así como variar los parámetros de profundidad de los circuitos, entre otros.
 - El desarrollo de un modelo numérico 3D que permita la simulación del canal de ensayos podría utilizar la metodología de experimentación y análisis descrita para investigar otro tipo de estructuras en condiciones de resonancia.
- Investigación de la compleja hidrodinámica observada en los circuitos de las estructuras ARJ-R de celdas circulares con clara influencia en la reducción de la longitud óptima necesaria para la atenuación de ondas largas con la misma efectividad que las estructuras ARJ-R de circuitos rectangulares de mayor longitud.
- Investigación del efecto en el proceso de interferencia de ondas de la pérdida de amplitud en la oscilación en el interior de los circuitos como consecuencia de la fricción.
- Investigación de la longitud eficaz de circuitos, pudiendo incluir estudios sobre la metodología óptima de determinación experimental que minimice el error en la apreciación visual.
- Investigación en relación al efecto de la variación de nivel del mar en la eficiencia de las estructuras ARJ-R.

Referencias

α φ

β λ

χ μ

δ ξ

ε υ

η ρ

- Abbott, M. B. 1979. *Computational Hydraulics: Elements of the theory of free surface flows*. Pitman, London.
- Abbott, M. B. y Madsen, P. A. 1990. *Modelling of Wave Agitation in Harbors*. The Sea. Vol. 9B, Ocean engineering science. J. Wiley & Sons, New York: B. Le Méhauté and D. M. Hanes, 1067-1103.
- Altomare, C. y Gironella, X. 2014. An experimental study on scale effects in wave reflection of low-reflective quay walls with internal rubble mound for regular and random waves. *Coastal Engineering*, 90, 51-63.
- Álvarez, A., Lomónaco, P., Bernardis, S., Vergnet, C y Lara, J.L. 2016. 3D physical model test of perforated cylindrical vertical breakwaters. *Coastlab Proceedings*, 6, 10 p.
- Atkins, T., Goshow, C. y Kenny, A. 2015. The assessment of harbor protection schemes for long period waves. *Australasian Coasts & Ports Proceedings*, 6 pp.
- Baquerizo, A., Losada, M.A., Smith, J.M. y Kobayashi, N. 1977. Cross-shore variations of wave reflection from beaches. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 123 (5), 274-279.
- Battjes, J.A. 1974. Surf similarity. *Coastal Engineering Proceedings*, 14, 466-480.
- Battjes, J. A. 1988. Surf-zone dynamics, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 20, 257-293.
- Battjes, J. A., Bakkenes, H. J., Janssen, T. T. y van Dongeren, A. R. 2004. Shoaling of subharmonic gravity waves, *J. Geophys. Res.*, 109, C02009, 15 pp.
- Behrendt, L., Johnson, I. G. y Skovgaard, O. 1985, *A finite Element Model for Water Wave Diffraction Including Boundary Absorption and Bottom friction*, Series Paper No. 37, Institute of Hydrodynamics and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark.
- Bellotti, G. 2007. Transient response of harbours to long waves under resonance conditions, *Coastal Engineering*, Volume 54, Issue 9, Pages 680-693.
- Bellotti, G., Briganti, R., Beltrami, G. M. y Franco, L. 2012. Modal analysis of semi-enclosed basins, *Coastal Engineering*, Volume 64, Pages 16-25.
- Biesel, F. y Le Méhauté, B. 1955. Aperçus sur la similitude des modèles réduits destinés à l'étude des seiches portuaires. *La Houille Blanche*, 3, 392-407.
- Booij, N., Holthuijsen, L. y Ris, R. 2001. The "SWAN" wave model for shallow water. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(25), 668-676.
- Bowen, A. J. y Guza, R. T. 1978, Edge waves and surf beat, *J. Geophys. Res.*, 83(C4), 1913-1920.
- Bowen, A.J. y Huntley, D.A., 1984. Waves, long waves and nearshore morphology, *Marine Geology*, 60, (1/4), 1-13.

- Bowen, A. J. y R. A. Holman 1989. Shear instabilities of the mean longshore current: 1. Theory, *J. Geophys. Res.*, 94 (C12), 18023-18030.
- Bowers, E. C., 1976. Long period oscillations of moored ships subject to short sea waves. *Trans. of the Royal Inst. of Naval Architects*, Vol. 118. P. 181.
- Bowers E. C. 1977. Harbour resonance due to set-down beneath wave groups. *J Fluid Mech.* Vol. 79, 71.
- Bowers, E. C. 1992. Low frequency waves in intermediate water depths. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(23), 832-845.
- Bressan, L. y Tinti, S. 2011. Structure and performance of a real-time algorithm to detect tsunami or tsunami-like alert conditions based on sea-level records analysis, *Nat. Haz. Earth Syst. Sci.*, 11(5), 1499-1521.
- Bressan, L. y Tinti, S. 2016. Statistical properties of coastal long waves analysed through sea-level time-gradient functions: exemplary analysis of the Siracusa, Italy, tide-gauge data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 223-237.
- Burcharth, H. F., Liu, Z., & Troch, P. (1999). Scaling of core material in rubble mound breakwater model tests. Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries Proceedings (COPEDEC V), 1518-1528.
- Bruun, P. 1956. Destruction of Wave Energy by Vertical Walls, *Journal, Waterways and Harbors Division*, American Society of Civil Engineers, WW1, 1-13.
- Bruun, P. 1989. *Port Engineering*, 4th ed., Vol 1, Gulf Publishing Company, Houston, TX.
- Candela, J., Mazzola, S., Sammari, C., Limeburner, R., Lozano, C.J., Patti, B. y Bonnano, A. 1999. The "Mad Sea" phenomenon in the Strait of Sicily, *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2210-2231.
- CEDEX. 2011. *Ensayos en modelo físico a gran escala sobre las secciones muelle cyes-R y dique cyes-A*. Informe Final. Tomo I. 89 pp.
- CEDEX. 2012. *Ensayos en modelo físico a gran escala sobre secciones tipo cajón antirreflejante cyrcuitex*. Informe Final. 147 pp.
- CEDEX. 2017. Canal de oleaje y viento de gran escala del CEDEX-CEPYC http://www.cedex.es/CEDEX/LANG_CASTELLANO/ORGANISMO/CENTYLAB/CEPYC/EQUIPAMIENTO/LEM2.htm (último acceso 21/03/2017).
- Chen, H.S., y Houston, J.R. 1987. *Calculation of Water Oscillation in Coastal Harbors; HARBS and HARBD User's Manual*, Instruction Report CERC-87-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Chen, G.Y., Chien, C.C., Su, C.H. y Tseng H.M. 2004. Resonance Induced by Edge Waves in Hua-Lien Harbor. *J Oceanogr*, 60, 1035-1043.

- Chen, X.F., Li, Y.C. y 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, 67-75.
- Cho, Y.J. y Kim, H.M. 2008. On the hydraulic characteristics of the efficient long wave energy absorber eco-breaker 2. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28-5B (9), 547-558 (En coreano con resumen en inglés).
- Chwang, A.T. y Dong, Z. 1984. Wave-trapping due to a porous plate. *15th Symposium on Naval Hydrodynamics Procc*, 32-42.
- Darwin, G. H. 1899. The tides and kindred phenomena in the solar system. The University Press, Cambridge. 416 pp.
- Defant, A. 1961. *Physical Oceanography*, Vol.2, Pergamon Press, Oxford, UK. 626 pp.
- de Jong, M. P. C. y Battjes, J. A. 2004. Low-frequency sea waves generated by atmospheric convection cells, *J. Geophys. Res.*, 109, C01011. 18 pp.
- Deltares. 2013. *PHAROS - User & Technical Manual - Version 9.11.19731*. Delft.
- Demirbilek, Z., y Panchang, V. 1998. *CGWAVE: A coastal surface water wave model of the mild slope equation*. Coastal and Hydraulics Laboratory Technical Report CHL-98-26. Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Demirbilek, Z., Nwogu, O. G. y Zundel, A. V. 2007. *Intra-gravity wave input toolbox (IGWT): User's guide*. Coastal and Hydraulics Laboratory Technical Note ERDC/CHL CHETN I-73. Vicksburg, MS, U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Demirel, V., y Wang, S. 2011. A numerical simulation to transient wave induced harbor oscillations using boundary element technique. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(20), 124-135.
- Díaz-Hernández, G. 2006. *Análisis de resonancia portuaria: generación, transitoriedad, no linealidad y acoplamiento geométrico*. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria. 570 pp.
- Diaz-Hernandez, G., Armesto, J.A., Mendez, F.J. y Medina, R. 2011. Metodología para la caracterización de las ondas de infragravedad en el litoral español. *Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, pp. 271-280.
- Diaz-Hernandez, G., Mendez, F.J., Losada, I.J. y Medina, R. 2015. A nearshore long-term infragravity wave analysis for open harbours. *Coastal Engineering*, 97, pp. 271-280.
- Diaz-Hernandez, G. Lara, J.L. y Losada, I.J. 2016. Extended Long Wave Hindcast inside Port Solutions to Minimize Resonance. *J. Mar. Sci. Eng.*, 4, 9, 14 pp.

- Donn, W. L. 1964. Alaskan earthquake of 27 March 1964: remote seiche stimulation. *Science*, 145, 261-262.
- Falnes, J. 2004. *Ocean waves and oscillating systems. Linear interactions including wave energy extraction*. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 275 pp.
- Faraci, C., Scandura, P. y Foti, P. 2015. Reflection of sea waves by combined caissons. *J. Waterways Harbors Coastal Eng. Div.*, 141 (2), 12 pp.
- Foda, M. A. y Mei, C. C. 1981. Nonlinear excitation of long trapped waves by groups of short swells. *J. Fluid. Mech.*, 111, 319-345.
- Forel, F. A. 1895. *Le Léman-monographie limnologique (vol. 2)*. Mécanique. Chimie. Thermique. Optique. Acoustique. Lausanne: F. Rouge. 651 pp.
- Fugazza, M. y Natale, L. 1992. Hydraulic design of perforated breakwaters. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 118(1), 1-14.
- Funke, E.R. y Mansard, E.P.D. 1980. On the synthesis of realistic sea states. *Coastal engineering proceedings*, 17, 2974-2991
- Gallagher, B. 1971. Generation of surf beat by non-linear wave interactions. *J. Fluid Mech.*, 49, 1-20.
- Garrido, J.M. y Medina, J.R. 2006. Study of reflection of perforated vertical breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 30, 12 pp.
- Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009a. *Elemento modular antirreflejante*. ES 2 299 394 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 17.12.2009.
- Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009b. *Dique antirreflejante*. ES 2 301 402 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 27.08.2009.
- Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009c. *Bloque antirreflejante*. ES 2 301 403 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 17.12.2009
- Garrido, J. M. 2012. *Análisis y estimación de la reflexión del oleaje en estructuras marítimas antirreflejantes tipo Jarlan*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. 458 pp.
- Garrido, J.M. y Medina, J.R. 2012. New neural network-derived empirical formulas for estimating wave reflection on Jarlan-type breakwaters. *Coastal Engineering*. 62, 9-18
- Gierlevsen, T, Hebsgaard, M. y Kirkegaard, J. 2001. Wave disturbance modelling in Port of Sines, Portugal with special emphasis on long period oscillations. *Proceedings International Conference on Port and Maritime R&D and Technology*, Singapore, 8 pp.
- Giese, G. S., y Chapman, D. C. 1993. Coastal seiches, *Oceanus*, spring issue, 38-45.

- Gilmour, A. E. 1990. Response of Wellington harbour to the tsunamis of 1960 and 1964. *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.* 24, 229-231.
- G.I.O.C. 2000. OLUCA-SP, *Modelo espectral de propagación de oleaje y corrientes en playas. Manual de referencia*, Universidad de Cantabria - Ministerio de Medio Ambiente. Santander (España), 170 pp.
- Greenspan, H.P., 1956: The generation of edge waves by moving pressure disturbances, *J. Fluid Mech.*, 1, 574-592.
- Goda, Y., y Suzuki, T. 1977. Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Coastal Engineering Proceedings*, 15 (1), 828-845.
- Goda, Y. 2010. *Random seas and design of maritime structures (3rd Edition)*. World Scientific. Singapore. 732 pp.
- Gomi, P., Rousset, J.M., Ropert, F. y Sergent, P. 2002. Modélisation numérique du comportement hydraulique des caissons Jarlan. *Actes Vilèmes des Journées Nationales Génie Civil*, 7, 451-461.
- González-Escrivá, J.A., Zarranz, G., Ripoll, E., Moreno, C. y Medina, J.R. 2007. Elemento modular GMAR y ARPA para muelles antirreflejantes. *Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, 10 pp.
- González-Escrivá, J.A. 2008. *Informe Fase I: Diseño de la instalación*. Informe interno del Convenio para la implementación de viento en el canal de oleaje de grandes dimensiones del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX (no publicado), 662 pp.
- González-Escrivá, J.A. y Medina J.R. 2012. Antirreflective vertical structure extended for attenuation of low frequency waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 33 (1), 9 pp.
- González-Escrivá, J.A., Medina, J.R. y Garrido, J.M. 2017. Evaluación de la atenuación de la resonancia en puertos mediante estructuras antirreflejantes. *Libro de resúmenes de las XIV Jornadas Españolas de Puertos y Costas*.
- Gutiérrez-Serret, R., Lozano, J., Flores, J. y Carrasco, A. 2006. Ensayos en modelo físico para el diseño de soluciones de cajones de baja reflexión en muelles y diques de abrigo. *III Seminario internacional de ingeniería y operación portuaria de la Sociedad Chilena de Ingeniería hidráulica*, 1-16.
- Gutiérrez-Serret, R. y Grassa, J. 2016. Diseño, construcción y explotación de diques de abrigo portuario en España desde finales del siglo XX. *VII Seminario internacional de ingeniería y operación portuaria de la Sociedad Chilena de Ingeniería hidráulica*, 1-17.
- Harkins, G., y Briggs, M. 1994. Resonant forcing of harbors by infragravity waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 24 (1), 806-820.

-
- Havelock, T. H. 1940. The Pressure of Water Waves upon a Fixed Obstacle. *Proc. R. Soc. Lond.*, 409-421.
- Henry, R.F., y Murty, T.S. 1995. Tsunami amplification due to resonance in Alberni Inlet: Normal modes, in *Tsunami., Progress in Prediction, Disaster Prevention and Warning*, Y. Tsuchiya and N. Shuto eds., Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, 117-128.
- Herbers, T.H. C., Elgar, S. y Guza, R. 1994. Infragravity-Frequency (0.005-0.05 Hz) Motions on the Shelf. Part I: Forced Waves. *J. Phys. Oceanogr.*, 24 (5), 917-927.
- Herbers, T. H. C., Elgar, S., O Guza, R. T. y O'Reilly W. C. 1995. Infragravity-frequency (0.005-0.05 Hz) motions on the shelf, Part II: Free waves, *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (6), 1063-1079.
- Herbers, T. H. C., Elgar, S. y Guza, R. T. 1995, Generation and propagation of infragravity waves, *J. Geophys. Res.*, 100 (C12), 24863-24872.
- Hibiya, T. y Kajiura, K. 1982. Origin of 'Abiki' phenomenon (kind of seiches) in Nagasaki Bay, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 38, 172-182.
- Hinwood, J.B. y Mclean, E.J. 2013. Effects of the March 2011 Japanese Tsunami in Bays and Estuaries of SE Australia, *Pure Appl. Geophys.*, 170, 1207-1227.
- Hiraishi, T. 2006. Development of long period wave absorber. *Intl. Offshores and Polar Engineering Proceedings*, 16, 621-625.
- Hiraishi, T., Hirayama, K., Kozawa, K. y Moriya. Y. 2009. Wave absorbing capacity of long period wave countermeasures in harbor. *Technical note of the port and airport research institute*, 1205, 2-7 (en japonés, resumen en inglés).
- Holman, R. A. 1981. Infragravity energy in the surf zone, *J. Geophys. Res.*, 86 (C7), 6442-6450.
- Honda, K., Terada, T., Yoshida, Y. e Isitani D. 1908. An investigation on the secondary undulations of oceanic tides, *J. College Sci., Imper. Univ. Tokyo*, 108 p.
- Hudson, R.Y., Herrman, F.A., Sager, R.A., Whalin, R.W., Keulegan, G.H., Chatam, C.E. y Hales, L.Z. 1979. *Coastal hydraulic models*, US Army Corps of Engineers, CERC., 531 pp.
- Hughes, Steven A. 1993. *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, World Scientific, Singapore. 568 pp.
- Huntley, D. A. 1976. Long-period waves on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, 81(36), 6441-6449.
-

- Ibañez, P. 2008. Energía de las olas: situación y futuro. *Xornada sobre enerxía que vén do mar*. (http://www.udc.es/iuem/documentos/doc_xornadas/anaeco/APROVEITAMENTODAENERXIADASOLAS.pdf, último acceso 20/03/2017)
- Ippen, A. T., y Goda, Y. 1963. *Wave Induced Oscillations in Harbors: The Solution for a Rectangular Harbor Connected to the Open-sea*. Report 59, Hydrodynamics Lab., Mass. Inst. Technology, Cambridge, MA.
- Ippen, A. T y Raichlen, F. 1962. *Wave induced oscillations in harbors*. Hydrodyn. Lab. Dep. Civil Eng., M.I.T. Rep. 49. 94 pp.
- Iribarren, R. y Nogales, C. 1948. Corrientes y oscilaciones de resacas en el interior de los puertos. *Revista de Obras Públicas*, 96, tomo I (2796): 150-157.
- Iribarren, C.R. y Nogales, C, 1949. Protection des Ports, *XVII Int. Nav. Congress Procc.* 31-80.
- Iribarren, R. y Nogales, C. 1950. Talud límite entre la rotura y la reflexión de las olas. *Revista de Obras Públicas*, 98, tomo I (2818): 65-72.
- Iribarren, R., Nogales, C. y Fernández, P. 1958. Onda de resaca en los puertos. Ensayos de resonancia en modelos reducidos. *Revista de Obras Públicas*, 106, tomo I (2914): 69-81.
- Isaacson, M., Baldwin, J., Allyn, N. y Cowdell, S. 2000. Wave interactions with perforated breakwater. *J. Waterways Harbors Coastal Eng. Div.*, 126 (5), 229-235.
- Iwagaki, Y. y Murakami, H. 1972. Harbor Oscillations Induced by Composite Waves in Rectangular Basins Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., 21(4) 265-277.
- James, W. 1968. Rectangular resonators for harbor entrances. *Coastal Engineering Proceedings*, 12 (2), 1512-1530.
- James, W. 1970. Spectral response of harbor resonator configurations. *Coastal Engineering Proceedings*, 13 (4), 2181-1530.
- Jarlan, G.E. 1961. A perforated vertical breakwater, *The Dock and Harbour Authority*, Vol. 21, n° 486, 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, 23-64.
- Kakuno, S., Oda, K. y Liu, P.L.F. 1992. Scattering of water waves by vertical cylinders with a backwall, *Coastal Engineering Proc.* 23 (2), 1258-1271
- Kamphuis, J.W. 2015. Physical modelling - Renewed importance. *International Compendium of Coastal Engineering*. Chapter 7. Sato, S. y Isobe, M. Eds. World Scientific. Singapore. 532 pp.

-
- Kinsler, L.E., Frey, A.R., Coppens, A.B. y Sanders, J.V. 2010. *Fundamental of Acoustics*. 4th ed. Wiley, 568 pp.
- Kinsman, B., 1965. *Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 676 p.
- Kofoed-Hansen, H., Kerper, D. R., Sorensen, O. R. y Kirkegaard, J. 2005. Simulation of long wave agitation in ports and harbours using a time-domain boussinesq model. *WAVES proceedings*, 11 pp.
- Kondo, H. 1979. Analysis of breakwaters having two porous walls, *Coastal Structures '79 Proc.*, 962–977.
- Korgen, B.J., 1995. Seiches, *American Scientist*, 83, 330-341.
- Kortenhaus, A., Oumeraci, H., Geeraerts, J., de Rouck, J., Medina, J.R. y González-Escrivá, J.A. 2004. Laboratory effects and other uncertainties in wave overtopping measurements, *Coastal Engineering Proceedings*, 29 (4), 4456-4468.
- Kostense, J., Meijer, K., Dingemans, M., Mynett, A., y van den Bosch, P. 2011. Wave energy dissipation in arbitrarily shaped harbours of variable depth. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(20), 2002-2016.
- Lamb, H., 1945: *Hydrodynamics*, 6th ed., Dover, New York, 738 p.
- Lara, J.L., Martin, F.L., Losada, I.J. y Diaz, G. 2004. Experimental analysis of long waves at harbour entrances, *Coastal Engineering Proceedings*, 29 (2), 1308-1320.
- Latt, N.Z. y Nakamura, T. 2011. Effectiveness of a newly developed resonator against tsunamis. *Colección de la Sociedad Civil B3 (Océano Desarrollo) JSCE*, 67 (2), 637-642.
- Le Méhautè, B., Divoky, D. y Lin, A. 1968. Shallow water waves. A comparison of theories and experiments. *Coastal Engineering Proceedings*, 11, 86-107.
- Le Méhautè, B. 1976. *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer-Verlag, New York, 323 p.
- Le Méhautè, B. 1990. Similitude. *The Sea. Vol 9. Part B*. Wiley, 955-980.
- Lean, G. H. 1971. Subharmonic motions of moored ships subjected to wave action. *Trans. of the Royal Inst. of Naval Architects*, Vol. 113, 387-399.
- Lee, J.J. 1970. *Wave induced oscillations in harbors of arbitrary shape*. Tesis doctoral, California Institute of Technology, 291 pp.
- Lee, J.J. y Raichlen, F. 1971. *Wave induced oscillations in harbors with connected basins*. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources Report, 26. CalTech, Pasadena, CA. (Unpublished), 135 pp.
-

- Lee, J.J. y Raichlen, F. 1971. Wave Induced Oscillations in Harbors with Connected Basins, *Report KH-R-26*, California Institute of Technology.
- Lee, J.J. y Raichlen, F. 1972. Oscillations in harbors with connected basins. *J. Waterways Harbors Coastal Eng. Div.* 98, 311-332.
- Lee, J.J., Lai, C.P. y Li, Y. 1998. Application of computer modeling for harbor resonance studies of Long Beach and Los Angeles Harbor basins. *Coastal Engineering Proceedings*, 24 (2), 1196-1209.
- Lee, J.-I. y Sungwon, S. 2014. Experimental study on the wave reflection of partially perforated wall caissons with single and double chambers. *Ocean Engineering* 91, 1-10.
- Lepelletier, T.G. 1981. *Tsunamis - harbor oscillations induced by nonlinear transient long waves*. Tesis doctoral, California Institute of Technology, 505 pp.
- Li, Y.C., Dong, G.H., Liu, H.J. y Sun, D.P. 2003. The reflection of oblique incident waves by breakwaters with double-layered perforated wall. *Coastal Engineering* 50, 47-60.
- Li, Y.C., Liu, Y. y Teng, B. 2006. Porous effect parameter of thin permeable plates. *Coastal Engineering*, 48 (4), 309-336.
- Lillycrop, L. S., Briggs, M. J., Harkins, G. S., Boc, S. J. and Okihiro, M. S. 1993. *Barbers Point Harbor, Oahu, HI, Monitoring Study*, Technical Report CERC-93-18, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., 239 pp.
- List, J. H. 1992. A model for the generation of two-dimensional surf beat, *J. Geophys. Res.*, 97 (4), 5623-5635
- Liu, P.L.-F. 1989. A note on long - waves induced by short-wave groups over a shelf. *J. Fluids Mech.*, 205, 163-170.
- Liu, Y., Li, Y.C., Teng, B. y Ma, B.L. 2007. Reflection of regular and irregular waves from a partially-perforated caisson breakwater with a rock-filled core. *Acta Oceanologica Sinica*, 26 (3), 129-141
- Liu, Y., Li, Y.C. y Teng, B., 2007. Wave interaction with a perforated wall breakwater with a horizontal porous plate. *Ocean Engineering*, 34, 2364-2373.
- Liu, H.J., Liu, Y. y Li, Y.C. 2009. The theoretical study on diagonal wave interaction with perforated-wall breakwater with rock fill. *Acta Oceanologica Sinica* 28 (6), 103-110.
- Liu, Y., Li, Y.-C., y Teng, B. 2016. Interaction between oblique waves and perforated caisson breakwaters with perforated partition walls. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 56, 143-155.

- Linares, Á., A. J. Bechle y Wu, C. H. 2016, Characterization and assessment of the meteotsunami hazard in northern Lake Michigan, *J. Geophys. Res. Oceans*, 121, 7141-7158.
- Longuet-Higgins, M.S., y Stewart, R.W. 1962. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf-beats', *J. Fluid Mech.*, 13, 481-504.
- Longuet Higgins M. S., y Stewart R. W. 1964. Radiation stresses in water waves: a physical discussion with applications. *Deep Sea Research*, 11, 529-562
- López, M., Iglesias, G. y Kobayashi, N. 2012. Long period oscillations and tidal level in the Port of Ferrol, *Applied Ocean Research*, (38), 126-134
- López, M., Iglesias, G. 2013. Artificial Intelligence for estimating infragravity energy in a harbour, *Ocean Engineering*, 57 (1), 56-63.
- Losada, I.J., Gonzalez-Ondina, J.M., Diaz-Hernandez, G. y Gonzalez, E.M. 2008. Numerical modeling of nonlinear resonance of semi-enclosed water bodies: Description and experimental validation, *Coastal Engineering*, 55 (1), 21-34
- Mansard, E.P.D. y Funke, E.R., 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering Proceedings.*, 17 (1), 154-172.
- Mansard, E.P.D. y Miles, M. 2010. Laboratory simulation of waves. Handbook of coastal and ocean engineering. Young C. Kim Ed., World Scientific. 10.2, 1107-1135.
- Martín Soldevilla, M.J. 2003. *Ondas de baja frecuencia: las ondas de grupo del litoral español*, Centro de Estudios de Puertos y Costas. CEDEX 144 pp.
- Martinez, S., J. Manuel, D. Yagüe, J. Garrido, D. Ponce de Leon, A. Berruguete, J.A. González-Escrivá and J.R. Medina. 2010. Designing a New Low-Reflexivity Quay Wall Caisson, *PIANC Proceedings*, 32, 949-963.
- Martinez, F. y Naverac, V. 2011. An experimental study of harbour resonance phenomena. *Coastal Engineering Proceedings*, 21 (1), 270-280.
- MARUCA (2009) *Caracterización Climática del Medio Físico Marino Español para la Optimización de la Explotación Portuaria y Navegación Marítima*. Programa Acción Estratégica de energía y cambio climático. Subprograma nacional: Movilidad sostenible y cambio modal en el transporte E17/08 del Ministerio de Fomento, <http://maruca.ihcantabria.es/> (ultimo acceso, 28/03/2017).
- McComb, P., Gorman, R. y Goring, D. 2005. Forecasting infragravity wave energy within a harbor. *WAVES Proceedings*, 5 (1)
- Medina, J.R. 1990. The dependency of inshore long waves on the characteristics of offshore short waves, by R.C. Nelson, P.D. Treloar and N.V. Lawson (discussion), *Coastal Engineering*, 14 (2), 185-190.

- Medina, J.R. 2001. Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. *J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg.*, 127 (4), 213-221.
- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A., Garrido, J.M. y de Rouck, J. 2002. Overtopping analysis using neural networks. *Coastal Engineering Proceedings*, 28 (3), 2165-2177.
- Medina, J.R., González-Escrivá, J.A. y Zarranz, G. 2010. *Proyecto MUCAR: muelles de cajones antirreflejantes. Informe final.* (documento no publicado), 48 pp.
- Medina, J.R., J.A. González-Escrivá, L. Fort, S. Martínez, D. Ponce de Leon, J. Manuel, D. Yagüe, J. Garrido and A. Berruguete. 2010. *Vertical Maritime Structure with Multiple Chambers for Attenuation of Wave Reflection*, International PCT/EP2010/068000, EPO, The Hague, 23 pp.
- 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., 2016. *Vertical maritime structure with multiple unit chambers for attenuation of wave reflection.* Patente europea EP2504496B1.
- Mei, C.C., Liu, P.L.-F. e Ippen, A.T. 1974. Quadratic loss and scattering of long waves. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 100 (3), 217-239.
- Mei, C.C., 1992. *The applied dynamics of ocean surface waves*, World Scientific, London, 740 p.
- Mei, CC, Stiassnie, M. y Yue D.K-P. 2005a. Theory and applications of ocean surface waves. Part 1: Linear aspects. World Scientific, 513 pp.
- Mei, CC, Stiassnie, M. y Yue D.K-P. 2005b. Theory and applications of ocean surface waves. Part 2: Nonlinear aspects. World Scientific, 562 pp
- Melito, I., Cuomo, G., Franco, L. y Guza., R. 2007. Harbour resonance at Marina di Carrara: Linear and non linear aspects. *Coastal Structures Proceedings*, 1647-1658.
- Merian, J. R. (1828). *Ueber die Bewegung tropfbarer Flüssigkeiten in Gefässen*, ('Del movimiento de los líquidos en recipientes', tesis en alemán). Basilea (Suiza), 575 pp. [Reproduced by VonderMihll, K. 1886. *Math. Annalen* 27]
- Mid West Ports Authority. 2014. *Technical Symposium Long Period Wave Mitigation - Geraldton Harbour*. Proceedings and Papers. 149 pp., disponible en: https://www.midwestports.com.au/Assets/Documents/Document%20Centre/Publications/Technical_Symposium_-_Long_Period_Wave_Mitigation_-_Geraldton_Harbour.pdf (último acceso 25/03/2017)
- Miles, J.W. 1971. Resonant response of harbors: an equivalent circuit analysis. *J. Fluid Mech.* 46, 241-265.
- Miles, J.W. 1974. Harbor seiching, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 6, 17-36.

-
- Miles, J. W. y Munk, W. H. 1961. Harbor paradox. *J. Wtrwy. And Harb. Div.*, 87 (3), 111-132.
- Miller, G.R. 1972. Relative spectra of tsunamis: *Hawaii Inst. Geophys*, *HIG-72-8*, 7 p.
- Monserrat S., I. Vilibić y Rabinovich, A.B. 2006. Meteotsunamis: atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 1035-1051
- Mochizuki, H. y Mitsuhashi, W. 1990. A frequency filter for ocean waves. *Techno-Ocean '90 Proceedings*, 398-406.
- Munk, W.H. 1949. Surf beats. *Trans. Amer. Geophys. Un*, 30, 849-854.
- Munk, W.H. 1950. Origin and generation of waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(1), 1-4.
- Munk, W.H. 1962. Long waves, in *The Sea*, J. Wiley, New York, 647-663.
- Murty, T.S. 1977. *Seismic Sea Waves - Tsunamis*. Bull. Fish. Res. Board Canada 198, Ottawa, 337 p.
- Nakahima, S., Sekimoto, T., Nishihtat, T. y Ooshima, K. 2011. Study of new-type long-period wave absorber utilizing wave non-linearity. *Coastal Structures Procc.*, (1), 519-530
- Nakamura, T., Mochizuki, H. y Morita, S. 1996. Performance of a resonator designed by the wave filter theory. Applicability to a harbor. *Coastal Engineering Proceedings*, 25 (3) 1280-1292.
- Nakamura, T., Mochizuki, H. y Morita, S. 1996. Performance of a resonator designed by the wave filter theory. Applicability to a harbor. *Coastal Engineering Proceedings*, 25 (3) 1280-1292.
- Nakamura, T. y Morita, S. 1998. Attenuation of very long waves by a large resonator as an outer harbor. *Coastal Engineering Proceedings*, 26 (3) 1210-1221.
- Nelson, R.C., Treloar, P.D. y Lawson, N.V. 1988. The Dependency of Inshore Long Waves on the Characteristics of Offshore Short Waves. *Coastal Engineering*, 12, 213-231.
- Neumann, von G. 1944. Die impedanz mechanischer Schwingungssysteme und ihre Anwendung auf die Theorie der Seiches. *Ann. D. Hydr. Usw.*, 72 (3), 65-79.
- Neumann, G. y Pierson, W.J. 1966. *Principles of Physical Oceanography*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 545 pp.
- Nwogu, O. 2000. Time domain simulation of long period oscillations in harbours. *Coastal Engineering Proceedings*, 27 (4). 3643-3654.
- Nwogu, O.G., y Demirbilek, Z. 2001. *BOUSS-2D: A Boussinesq wave model for coastal regions and harbors - Report 1: Theoretical Background and User's Manual*.
-

- ERDC. CHL TR-01-25. Vicksburg, MS: US Army Engineer Research and Development Center, 2001.
- Oliveira, T.C.A., Sanchez-Arcilla, A., Gironella, X. y Madsen, O.S. 2017. On the generation of regular long waves in numerical wave flumes based on particle finite element method. *Journal of Hydraulic Research*, DOI:10.1080/00221686.2016.1275047
- Okiihiro, M., Guza, R.T. y Seymour, R.J. 1992. Bound infragravity waves. *J. Geophys. Res.*, 97, pp. 11453-11469.
- Okiihiro, M., Guza, R.T. y Seymour, R.J. 1993. Excitation of seiche observed in a small harbor, *J. Geophys. Res.*, 98, (C10), 18,201-18,211.
- Okiihiro, M. y Guza R.T. 1996. Observations of seiche forcing and amplification in three small harbors. *J. Water. Port Coast. Ocean Engr.*, 122, 232-238.
- Orlić, M. 1980. About a possible occurrence of the Proudman resonance in the Adriatic, *Thalassia Jugoslavica*, 16 (1), 79-88.
- Oumeraci, H., Kortenhaus, A., Allsop, W., de Groot, M., Crouch, M. Vrijling, H. y Voortman, H. 2001 *Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*. Swets & Zeitlinger B.V., Lisse.373 pp.
- Oumeraci, H. 2010. Non-Conventional Wave Damping Structures. Invited Chapter. *Handbook of coastal and ocean engineering*, Y. C. Kim, ed., World Scientific, Singapore, 287-316.
- Ohshima, K., Mriya, Y. y Watanabe Y. 2007. Wave-absorbing performances for new type of long period wave absorption structure (OWLS). *Coastal Structures Procc.* (2), 1386-1396.
- Palomino, M.C., Almazán, J.L. y Arrayás, J.L. 2001. *Oscilaciones en masas de agua confinadas: resonancia en puertos*. Ed: UPM, Madrid, 69 pp.
- Park, J., MacMahan, J., Sweet, W.V. y Kotu, K. 2016. Continuous seiche in bays and harbors. *Ocean Science*, 12, 355-368.
- Pattiaratchi, C.B. y Wijeratne, E.M.S. 2014. Observations of meteorological tsunamis along the south-west Australian coast. *Nat. Hazards*. 74 (1), 281-303
- Poisson, S-D. 1828. Mémoire sur l'équilibre et mouvement des corps élastiques, *Mémoires de l'Académie des Sciences, Paris* 8, 357-570, 623-627.
- Polimón, J., 2002. *Dique rompeolas*. Nº Patente ES 2232248. Patente nacional.
- Proudman, J. 1929. The effects on the sea of changes in atmospheric pressure, *Geophys. Suppl. Mon. Notices R. Astr. Soc.*, 2 (4), 197-209.
- Pugh, D.T. 1996. *Tides, surges and mean sea-level*, Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd, 486 pp.

-
- Prandle, D. 1974. The use of wave resonators for harbour protection, *Dock Harbour Author.*, 55 (650), 279-280.
- Rabinovich, A.B. 1993. *Long Ocean Gravity Waves: Trapping, Resonance, and Leaking* (en ruso), Gidrometeoizdat, St. Petersburg, 325 p.
- Rabinovich, A.B. y Monserrat, S. 1996. Meteorological tsunamis near the Balearic and Kuril Islands: Descriptive and statistical analysis, *Natural Hazards*, 13, (1), 55-90.
- Rabinovich, A.B. 1997. Spectral analysis of tsunami waves: Separation of source and topography effects, *J. Geophys. Res.*, 102 (6), 12663-12676
- Rabinovich, A.B. y Thomson, R.E. 2007. The 26 December 2004 Sumatra tsunami: Analysis of tide gauge data from the World Ocean Part 1. Indian Ocean and South Africa, *Pure and Applied Geophysics*, 164, (2-3), 261-308.
- Rabinovich, A. B. 2009. Seiches and harbor oscillations. *Handbook of coastal and ocean engineering*, Y. C. Kim, ed., World Scientific, Singapore, 193-236.
- Rabinovich, A.B., Thomson, R.E. y Fine, I.V. 2013. The 2010 Chilean tsunami off the west coast of Canada and the northwest coast of the United States, *Pure and Applied Geophysics*, 170 (9-10), 1529-1565, 2013.
- Raichlen, F. 1966. Harbor resonance, *Estuary and Coastline Hydrodynamics*, A. T. Ippen, ed., McGraw-Hill, New York, 281-340.
- Raichlen, F. y Lee, J.J. 1992. Oscillation of bays, harbors and lakes. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. Ed. J. B. Herbich, Houston, 1073-1113.
- Raichlen, F., Lee, J.J. y Walker, J.R. 1997, Physical Modeling of Harbor Resonance. *Proceedings Wave '97*, Virginia Beach, VA, Nov. 1997.
- Resio, D. 1988. A Steady-State Wave Model for Coastal Applications, *Coastal Engineering Proceedings*, 21 (1), 929-940.
- Ripoll, E., Pardo, V., Zarranz, G., González-Escrivá, JA. y Medina, J.R. 2011. Experiencias españolas en la construcción de diques y muelles de cajones antirreflejantes. *Jornadas Españolas de Puertos y Costas*. XI. 12 pp.
- ROM 1.0-09 (2009) *Recomendaciones del diseño y ejecución de las Obras de Abrigo*. Ente Público de Puertos del Estado. Ministerio de Fomento (España), 532 pp.
- Schüttertrumpf, H., 2001. *Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen - Experimentelle und Theoretische Untersuchungen (Flujos de rebase en diques - Una investigación teórica y experimental)*. Tesis doctoral. Technischen Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 124 pp.
- Šepić, J. y Rabinovich, A.B. 2014. Meteotsunami in the Great Lakes and on the Atlantic coast of the United States generated by the "derecho" of June 29-30, 2012. *Nat. Hazards* 74, 75-107.
-

- Seymour, R.J. 1992. *Ocean energy recovery. The state of the art*. American Society of Civil Engineers, ASCE. New York. 317 pp.
- Shiraishi, N., Palmer, R.Q. y Okamoto, H. 1976. Quay Wall with wave absorber "IGLOO". *Coastal Engineering Proceedings*, 15 (4), 2677- 2696.
- Simiu, E. y Scandal, R.H. 1996. *Wind effects on structures: fundamentals and applications to design*. Wiley Interscience, 688 pp.
- Sollitt, C.K. y Cross, R.H. 1972. Wave transmission through permeable breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings* 13 (3). 1827–1846.
- Sørensen, O.R., Schäffer, H. A. y Sørensen, L.S. 2004. Boussinesq-type modelling using an unstructured finite element technique, *Coastal Engineering*, 50 (4), 181-198.
- Sørensen, R.M. y Thompson, E.F. 2008. Harbor hydrodynamics, *Coastal Engineering Manual*, Part II, U.S. Army Corps. Of Engineers, Washington, D.C., New York, Chapter 7, 1-92.
- Stiassnie, M. y Drimer, N. 2006. Prediction of long forcing waves for harbor agitation studies, 2006, *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng*, 132, 166-171.
- Suh, K.-D., Shin, S. y Cox, D.T. 2006. Hydrodynamic characteristics of curtain-wall-pile breakwaters. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 132 (2), 83-96.
- Suh, K.-D. 2009. Wave interaction with breakwaters including perforated walls. *Handbook of coastal and ocean engineering*, Y. C. Kim, ed., World Scientific, Singapore, 193, 317-339.
- Synolakis, C. 2003. Tsunami and Seiche. *Earthquake engineering handbook*. Chapter 9. 67, 91-9.67. Chen G. Y. y Scawthorn, C. Ed., CRC Press. Boca Raton, FL.
- Symonds, G., Huntley, D.A. y Bowen, A.J. 1982. Two-dimensional surf beat: Long wave generation by a time-varying breakpoint. *Journal of geophysical research*, 87 (1), 492-498.
- Tanaka, M., Matsumoto, A. y Hanzawa, M. 2014. Efficient long-period wave absorbing submerged mound structure. *Coastal Engineering Proc.*, 13 pp.
- Tanimoto, K. e Yoshimoto, Y. 1982. Theoretical and experimental study of reflection coefficient for wave dissipating caisson with a permeable front wall. *PAHRI Intitute Rep.* 21(3), 44–77 (en japonés, resúmen en inglés).
- Thompson, E. y Hadley, L.L. 1995. Numerical modeling of harbor response to waves. *J. Coastal Res.*, 11 (3), 744-753.
- Thotagamuwage, D.T. 2014. *Harbour oscillations: Generation and minimisation of their impacts*, Tesis doctoral. University of Western Australia. 154 pp.
- Thotagamuwage, D.T. y Pattiaratchi, C.B. 2014. Observations of infragravity period oscillations in a small marina. *Ocean Engineering*, 88, 435-445.

- Torres, R., Roso, E. y Mora, J. 2017. Cajones con celdas antirreflejantes: aspectos constructivos (Puerto de Granadilla). *Libro de resúmenes de las XIV Jornadas Españolas de Puertos y Costas*.
- Tucker, M.J. 1950. Surf beats: Sea waves of 1 to 5 minute period, *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, 202, 565-573.
- Twu, S.W. y Lin, D.T. 1991. On a highly effective wave absorber. *Coastal Engineering* 15, 389-405.
- Unluata, U. y Mei, C. C. 1975. Effect of entrance loss on harbor oscillations. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 101(2), 161-180.
- Ursell, F., 1952. Edge Waves on a Sloping Beach, *R. Soc. Lond. A Proc.*, 214, 79-97.
- Uzaki, K., Matsunaga, N., Nishii, Y. e Ikehata, Y. 2010. Cause and countermeasure of long-period oscillations of moored ships and the quantification of surge and heave amplitudes. *Ocean Eng.* 37 (2-3), 155-163.
- Valenbois, J. 1954. Les ouvrages résonants et leur application a la protection des ports. *Coastal Engineering Proceedings*, 5, 637-641.
- Van der Molen, W., Monárdez Santander, P. y Van Dongeren, A. R. 2006. Numerical simulation of long-period waves and ship motions in Tomakomai Port, Japan *Coast. Eng. J.* 48(1), 59-79.
- Van Dorn, W.G. 1984. Some tsunami characteristics deducible from tide records, *J. Phys. Oceanogr.* 14, 353-363.
- Vázquez, M., Negro, V., López-Gutiérrez, J.L. y Monsó, J.L. 2016. Evaluation of wave load son a new type of perforated caisson. *Maritime Engineering*, 169 (3), 124-139.
- Vilibić, I. y Mihanović, H. 2003. A study of resonant oscillations in the Split Harbour (Adriatic Sea), *Estuar. Coastal Shelf Sci.*, 56 (3-4), 861-867.
- Vis, F., Mol, C.C., Rita, M.M. y Deelen, C. 1985. Long waves and harbour design. *Num. & Hyd. Modelling of ports and harbours Procc.*, IAHR and BHRA, 249-255.
- Wiegel, R.L. 1960. Transmission of waves pasta a rigid vertical thin barrier. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 86 (1), 1-12.
- Wiegel, R.L. 1964. Tsunamis, storm surges, y harbor oscillations. Ch. 5 in *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 95-127.
- Wilson, B., 1972. Seiches, *Advances in Hydrosciences*, 8, 1-94.
- Woo, S.-B. y Liu, P.L-F. 2004. *Finite-element model for modified Boussinesq equations II. Applications to Nonlinear Harbor Oscillations*, *J Waterway, Port, Coastal Ocean Eng.*, 130 (1), 1-16.

- Xing, X., Lee, J. y Raichlen, F. 2010. Harbor resonance: a comparison of field measurements to numerical results. *Coastal Engineering Proceedings*, 32 (1), 12 pp.
- Yalciner, A.C. y Pelinovsky, E.N. 2007. A short cut numerical method for determination of periods of free oscillations for basins with irregular geometry and bathymetry. *Ocean engineering*, 34, 747-757.
- Yu, X.P. 1995. Diffraction of water waves by porous breakwaters. *J. Wtrwy., Harb. and Coast. Engrg. Div.*, 121(6), 275-282.
- Zelt, J.A. 1986. *Tsunamis: The Response of Harbors with Sloping Boundaries to Long Wave Excitation*, Report KH-R-47, W.M. Keck Lab. of Hydraulics and Water Resources, Calif. Inst. of Technology, Pasadena, CA, 334 pp.
- Zelt, J.A. y Skjelbreia, J. 1992. Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges. *Coastal Engineering Proceedings*, 1 (23), 777-789.

Anejo 1

Resultados de la experimentación física a escala reducida

En el presente anejo se representan, en unidades de prototipo, las gráficas correspondientes a los ensayos de simulación de respuesta resonante (SRR) a escala 1/11.6 descritos en el *Capítulo V*, correspondientes a las estructuras:

- REF (vertical reflejante)
- ARJ-R-CI (circuitos disipativos largos de celdas circulares)
- ARJ-R-CU (circuitos disipativos largos rectangulares), incluyendo las estructuras con modificaciones en la geometría de los cambios de dirección del flujo y resaltos.

La *Tabla A-1.1* recoge el resumen de los ensayos analizados y la nomenclatura empleada para su referencia.

La *Tabla A-1.2* muestra los valores de los periodos de oscilación registrados en los sensores 3, 5, 9 y 11, para ensayos SRR mediante análisis espectral.

Las *Figs. A-1.1* a *A-1.9* muestran los resultados espectro de potencia registrado en los casos indicados en la *Tabla A-1.2*.

Las *Figs. A-1.9* a la *A-1.50* incluyen las gráficas de evolución de la superficie libre en función del tiempo recortadas para valores de amplitud suficientemente amortiguados, ordenadas en función del periodo de las ondas generadas y en función del número de circuitos en la estructura (0 para la estructura REF, y 2, 4 y 6 para las estructuras ARJ-R).

Las *Figs. A-1.51* a la *A-1.56* incluyen las gráficas de ajuste exponencial de la energía en la fase de amortiguación de los ensayos SRR ordenadas en función del número de circuitos en la estructura (0 para la estructura REF, y 2, 4 y 6 para las estructuras ARJ-R).

VIII.1. Denominación de los ensayos de SRR.

Tabla A-1.1. Nomenclatura de los ensayos.

T[s]	REFLEJANTE		DISIPATIVA 2 CIRCUITOS		DISIPATIVA 4 CIRCUITOS		DISIPATIVA 6 CIRCUITOS		amp pala	H[m]		
	1-REF	2-REF	ARJ-R-CI-1	ARJ-R-CU-1	ARJ-R-CI-2	ARJ-R-CU-2	ARJ-R-CI-4	ARJ-R-CU-5			ARJ-R-CI-3	ARJ-R-CU-3
45		REF 45_15.21					CU-4 45_15.21	CU-5 45_15.21		CU-3 45_15.21	0.15	0.4
	REF 45_25.11	REF 45_25.21	CI-1 45_25.11	CU-1 45_25.21	CI-2 45_25.11	CU-2 45_25.21	CU-4 45_25.21	CU-5 45_25.21	CI-3 45_25.11	CU-3 45_25.21	0.25	0.7
	REF 90_15.11	REF 90_15-21	CI-1 90_15.11	CU-1 90_15.21	CI-2 90_15.11	CU-2 90_15.21	CU-4 90_15.21	CU-5 90_15.21	CI-3 90_15.11	CU-3 90_15.21	0.15	0.7
90		REF 90_25.22				CU-2 90_25.21	CU-4 90_25.21	CU-5 90_25.22		CU-3 90_25.21	0.25	1
135	REF 135_90.11		CI-1 135_65.11								0.90	

denominación de ensayos: "ESTRUCTURA PERIODO_AMPALA_FASE+REPETICION"

ejemplo: CI-1 45_25.21

CU-N (2xN circuitos de celdas cuadradas)

CI-N (2xN circuitos de celdas circulares)

factor relacionado con la amplitud de la pala generadora (15=0.15; 25=0.25; 65=0.65)

FASE: 1 (período de experimentación 1) 2 (período de experimentación 2)

REPETICIÓN: 1 (sin repetición) 2 (1 repetición)

VIII.2. Resultados del análisis espectral.

Tabla A-1.2. Periodos resonantes registrados en los sensores 3, 5, 9 y 11, para ensayos SRR mediante análisis espectral.

<i>Analisis espectral con SIGVIEW ®</i>				
$T_{generado} [s]$	<i>Sensor</i>	$T_{modo 1} [s]$	$T_{modo 2} [s]$	$T_{otros} [s]$
45	S3	87.2	42.3	-
	S5	87.2	42.0	-
	S9	-	42.0	-
	S11	87.2	42.3	28.8
60	S3	87.2	42.3	-
	S5	87.2	42.3	28.8
	S9	87.2	42.3	28.8
	S11	87.2	42.3	28.8
75	S3	87.2	42.1	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.0	27.2
	S11	87.2	42.0	28.8
90	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	-	-
	S11	87.2	-	-
120	S3	85.9	41.9	118.7
	S5	85.9	42.0	-
	S9	85.9	42.0	118.7
	S11	85.9	42.0	118.7
135	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.1	-
	S11	87.2	42.1	-
180	S3	87.2	42.1	-
	S5	87.2	42.1	-
	S9	87.2	42.1	28.8
	S11	87.2	42.1	28.8
300	S3	87.2	-	-
	S5	87.2	-	-
	S9	87.2	42.1	-
	S11	87.2	42.1	-

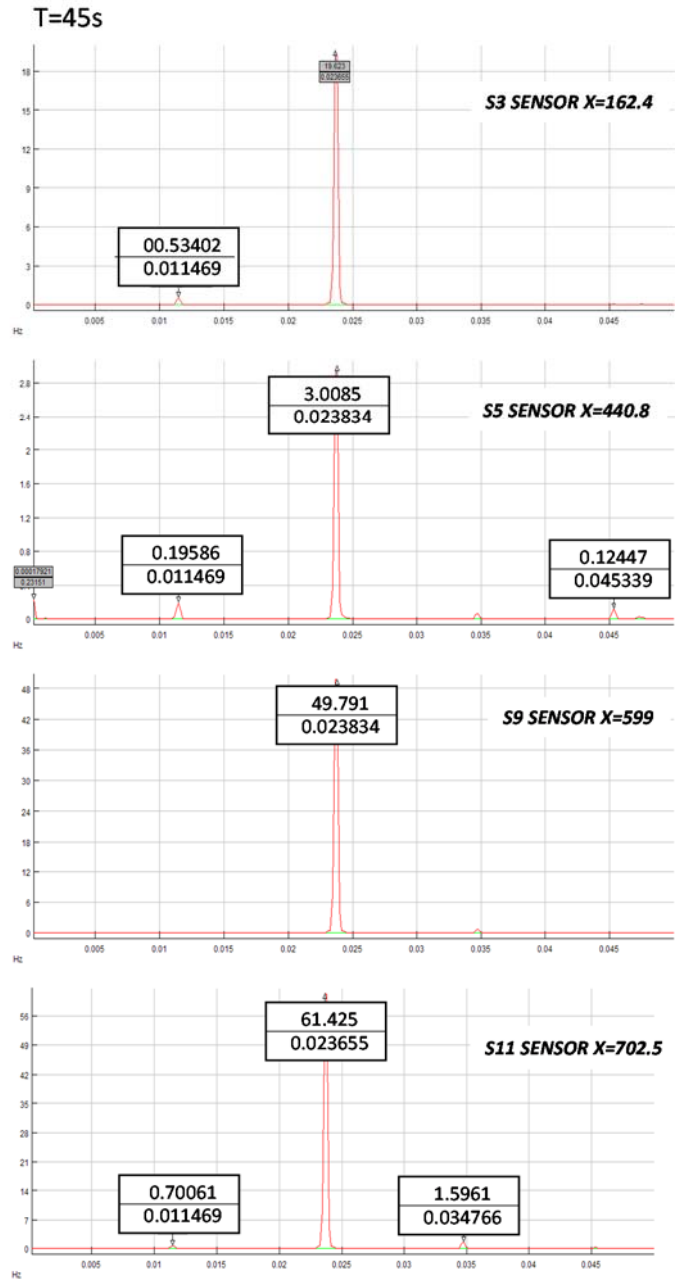


Figura A-1.1. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=45s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x =frecuencia en Hz; y =espectro de potencia).

T=60s

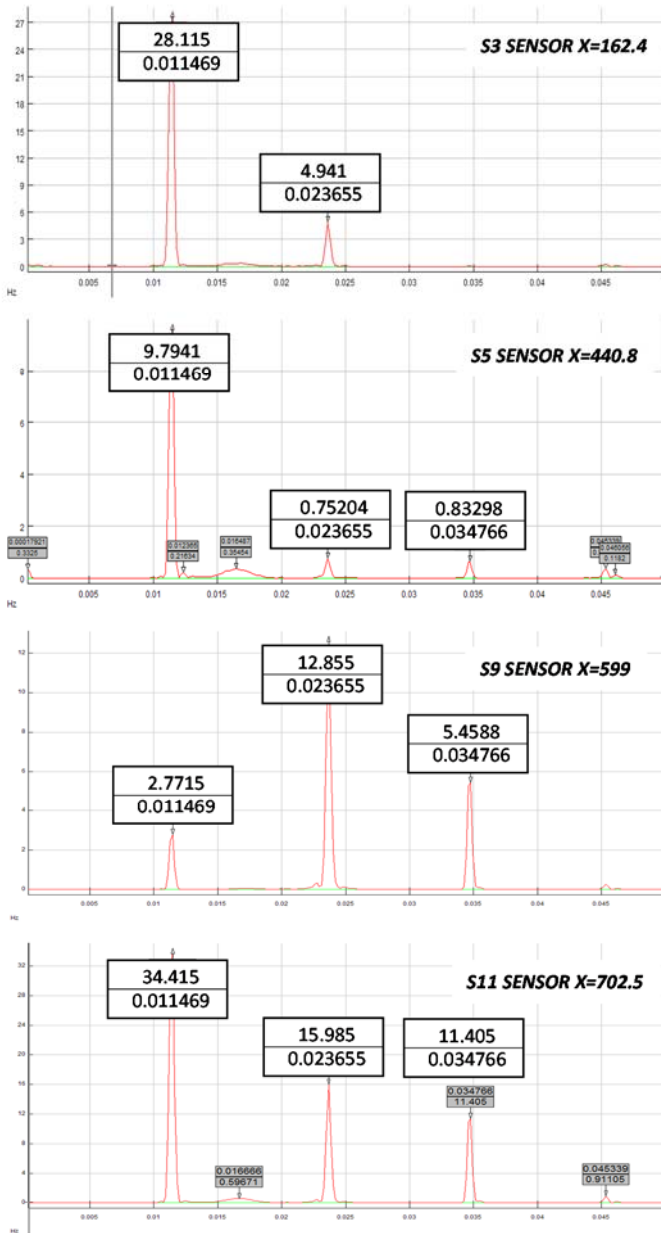


Figura A-1.2. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=60s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x =frecuencia en Hz; y =espectro de potencia).

T= 75s

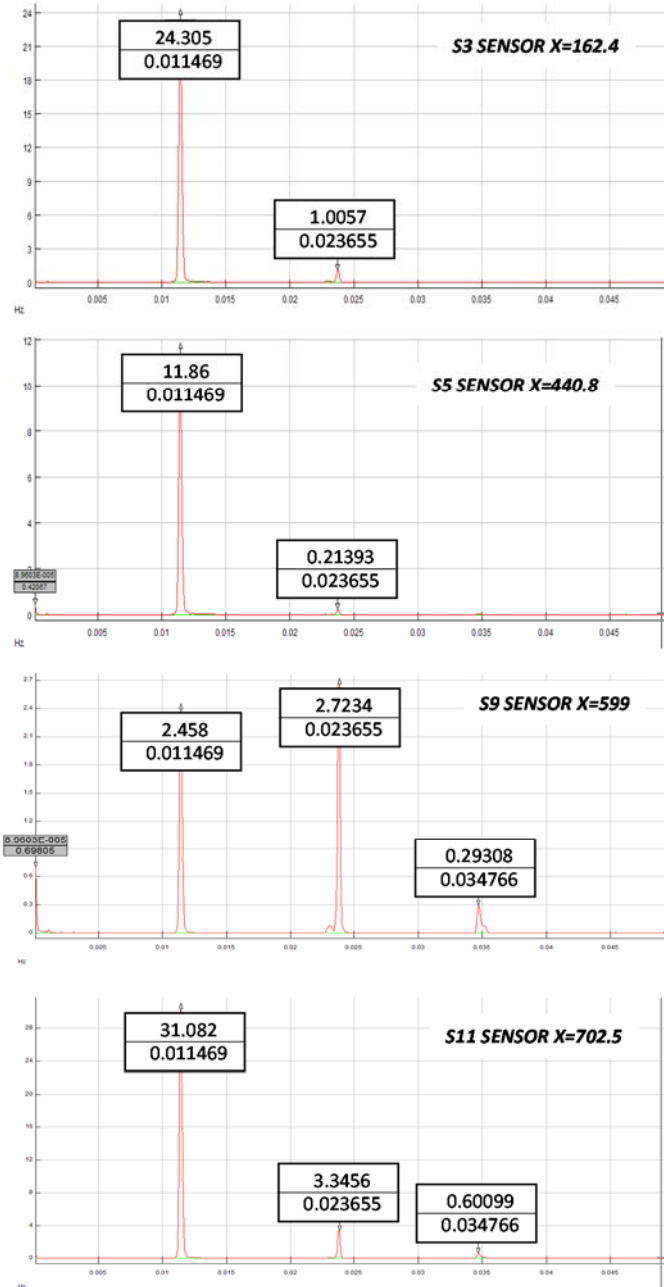


Figura A-1.3. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=75s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x =frecuencia en Hz; y =espectro de potencia).

T=90s

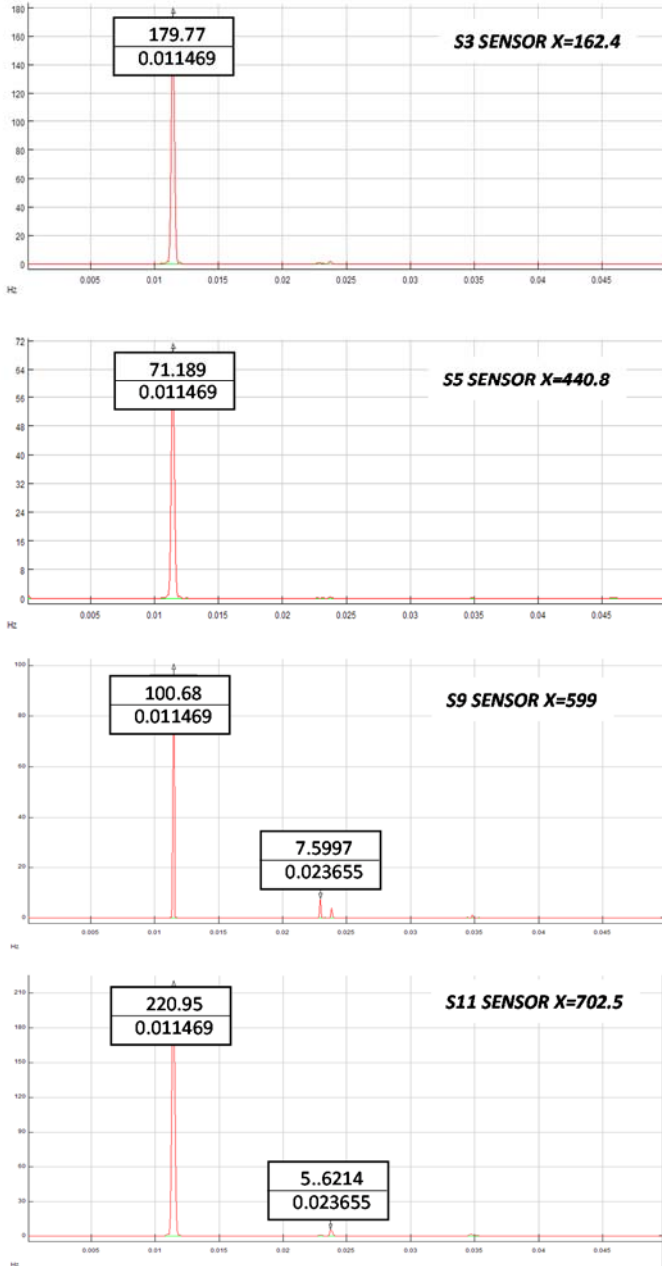


Figura A-1.4. Espectro de potencia para ondas generadas con T-90s en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x=frecuencia en Hz; y=espectro de potencia).

T=120s

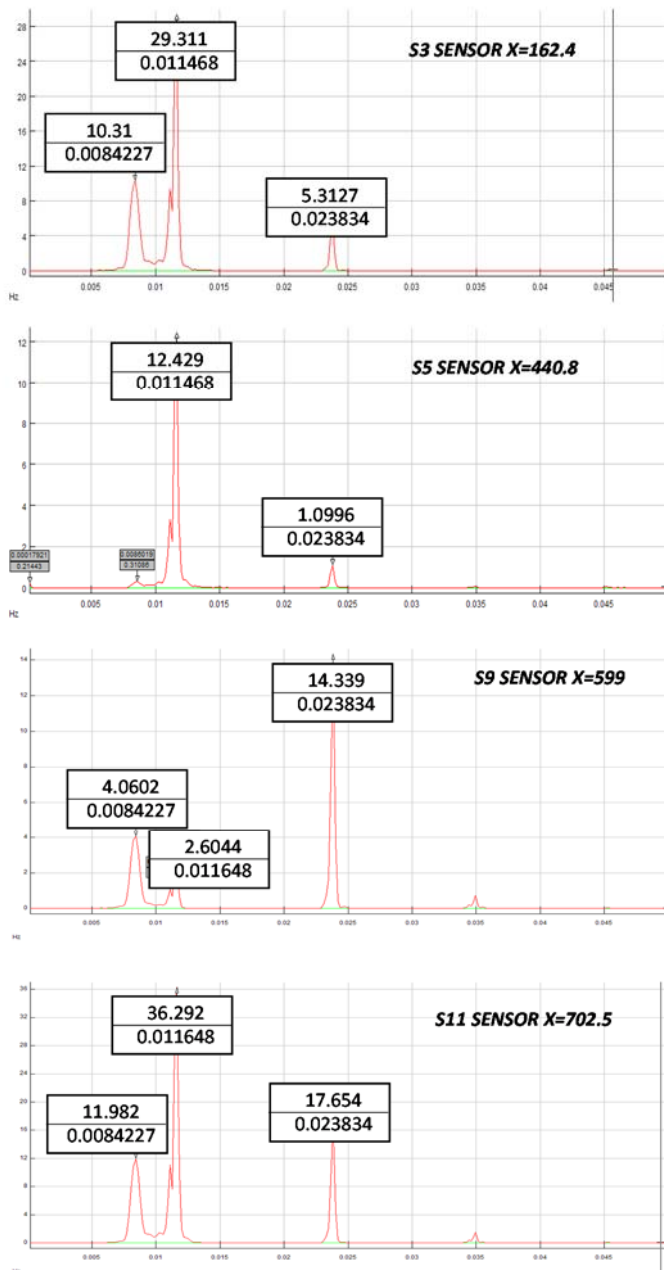


Figura A-1.5. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=120s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x =frecuencia en Hz; y =espectro de potencia).

T=135s

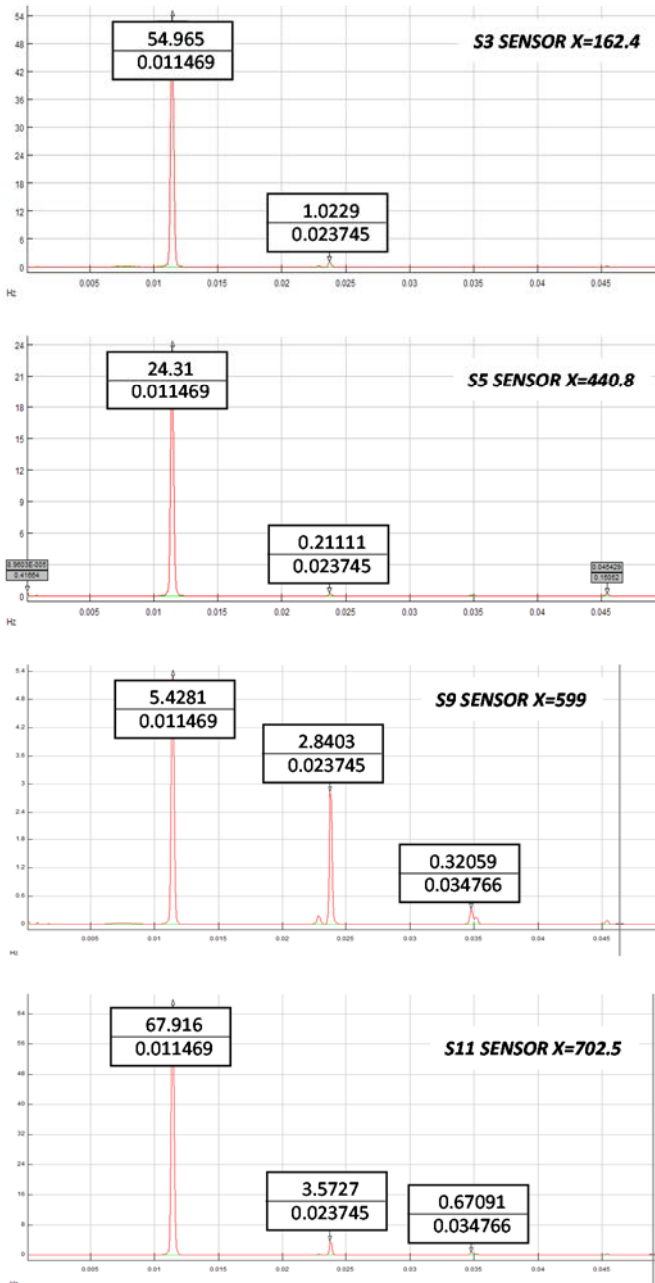


Figura A-1.6. Espectro de potencia para ondas generadas con T=135s en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x=frecuencia en Hz; y=espectro de potencia).

T=180s

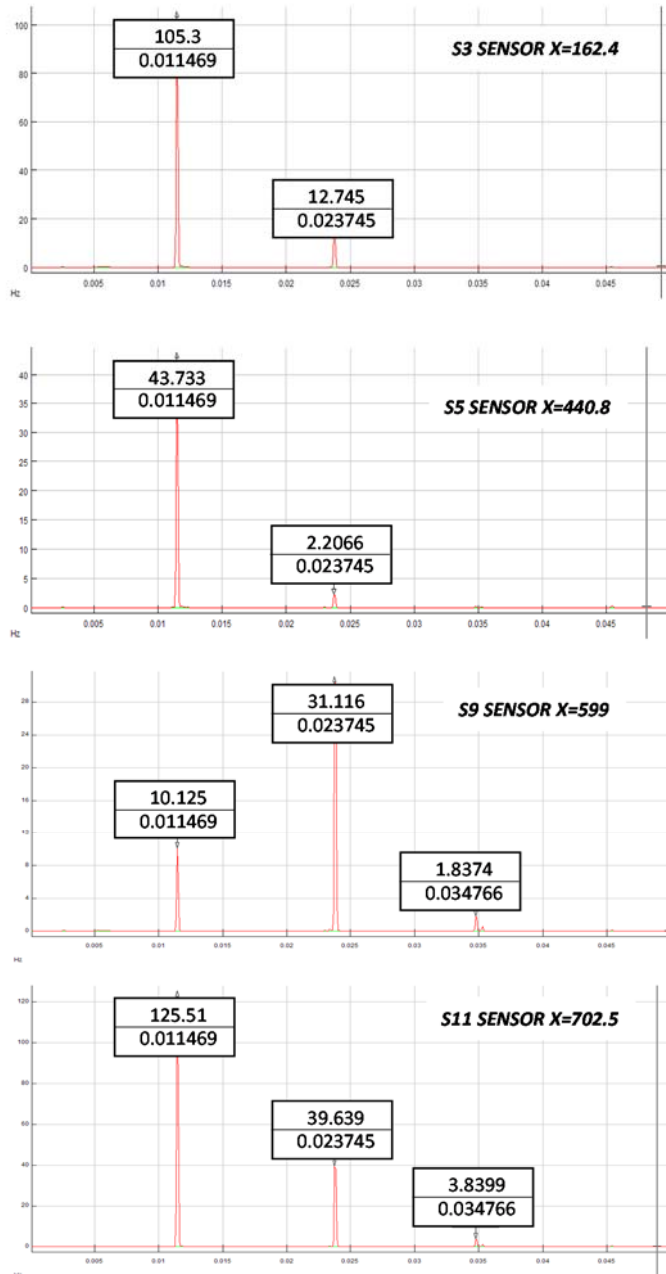


Figura A-1.7. Espectro de potencia para ondas generadas con T=180s en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x=frecuencia en Hz; y=espectro de potencia).

T=300s

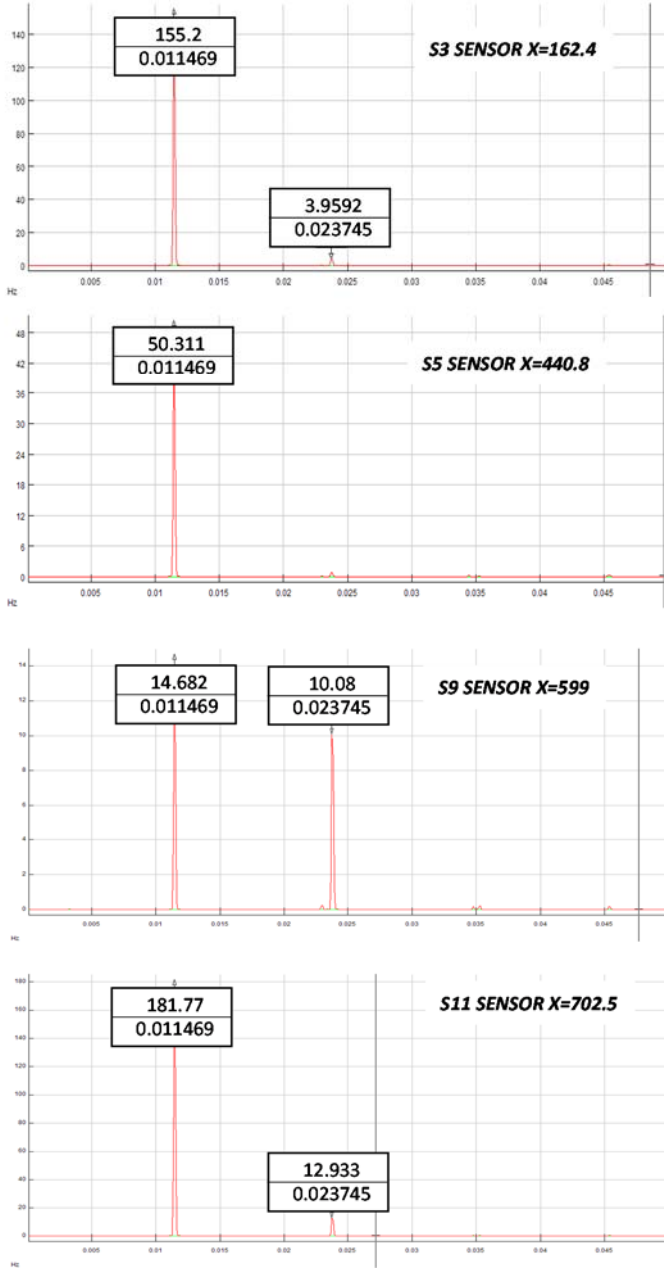


Figura A-1.8. Espectro de potencia para ondas generadas con $T=300s$ en los sensores S3, S5, S9 y S11 en la dársena canal (ejes: x =frecuencia en Hz; y =espectro de potencia).

VIII.3. Representación gráfica de las series temporales de elevación de la superficie libre.

El criterio de ordenación para la exposición se corresponde, en primer lugar con el número de circuitos disipativos (estructura vertical completamente reflejante, $N_{REF}=0$ circuitos) y en segundo lugar, con el periodo de las oscilaciones forzadas mediante el generador de ondas.

VIII.3.1. Estructura impermeable (REF)



Figura A-1.9. Modelo a escala 1/11.6 de la estructura vertical completamente reflejante (REF).

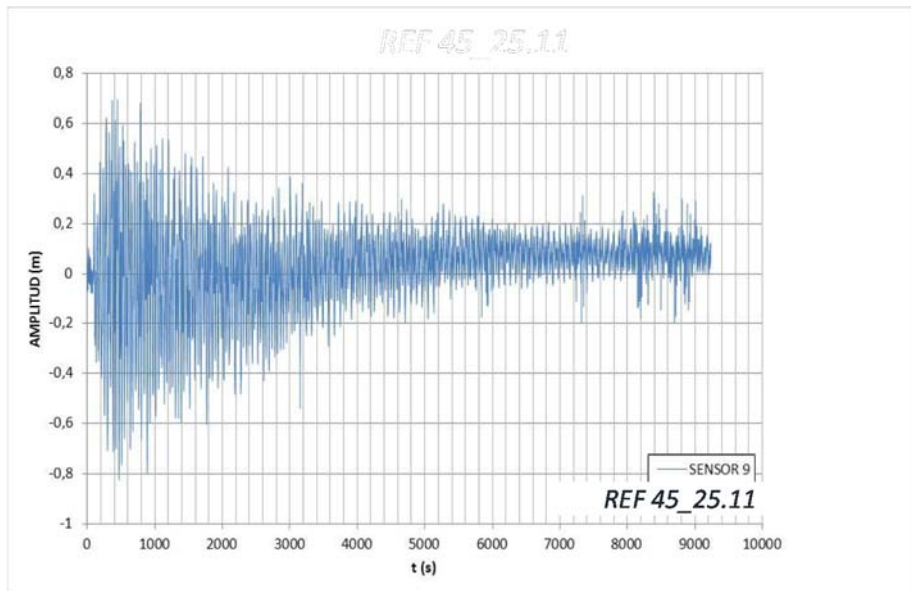


Figura A-1.10. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud de 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

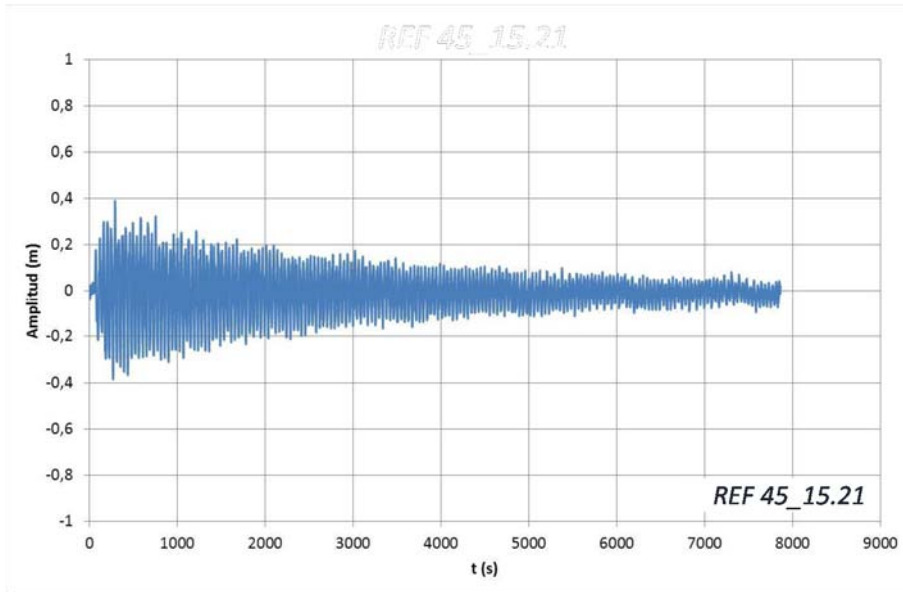


Figura A-1.11. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

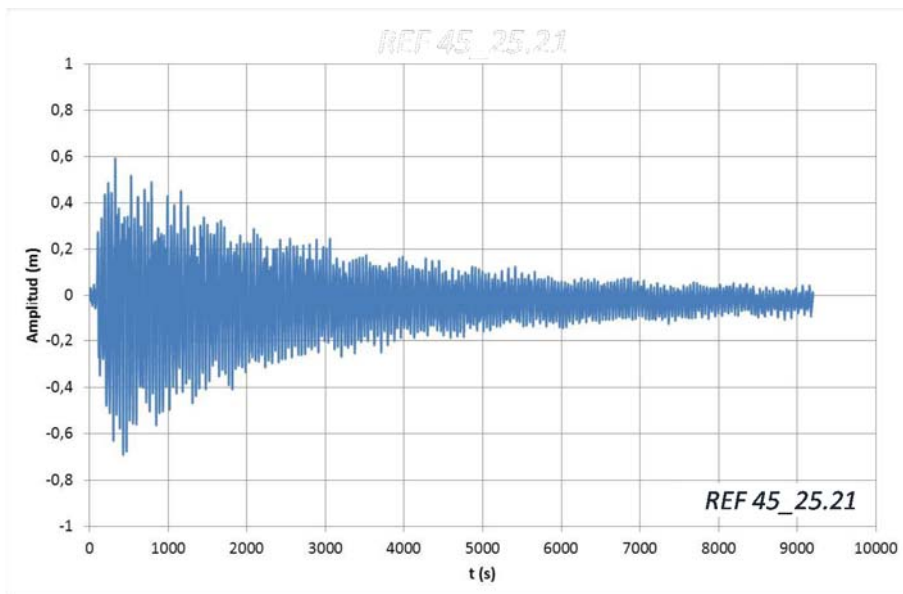


Figura A-1.12. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

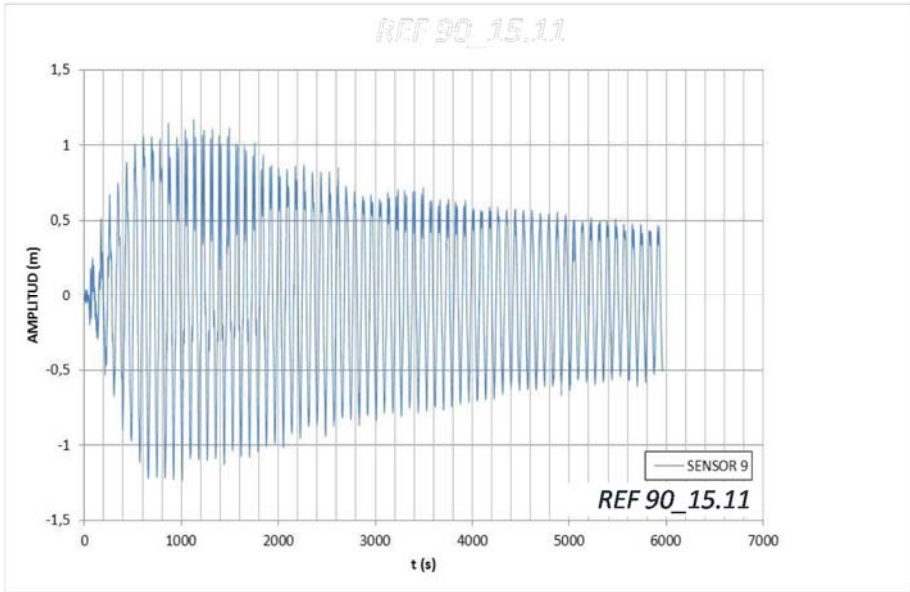


Figura A-1.13. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

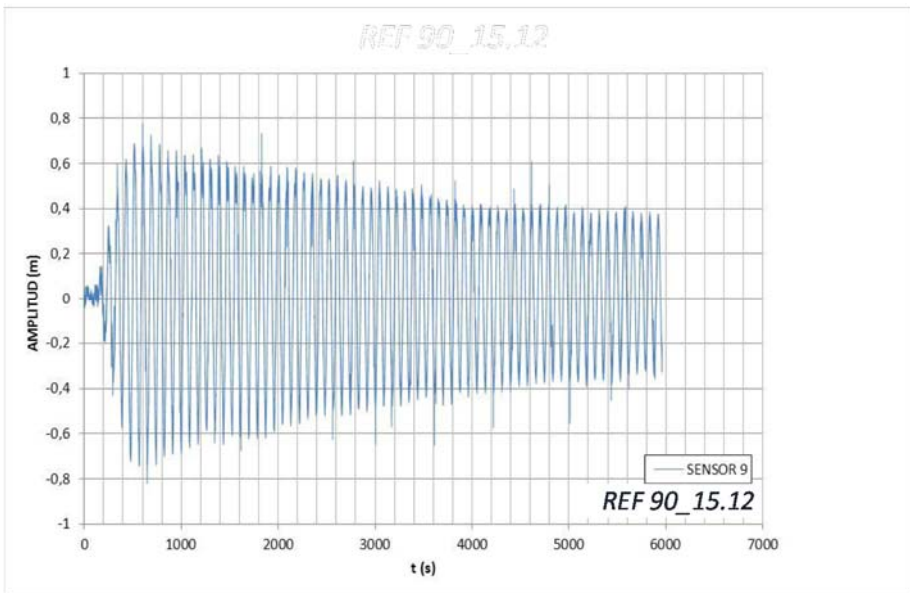


Figura A-1.14. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

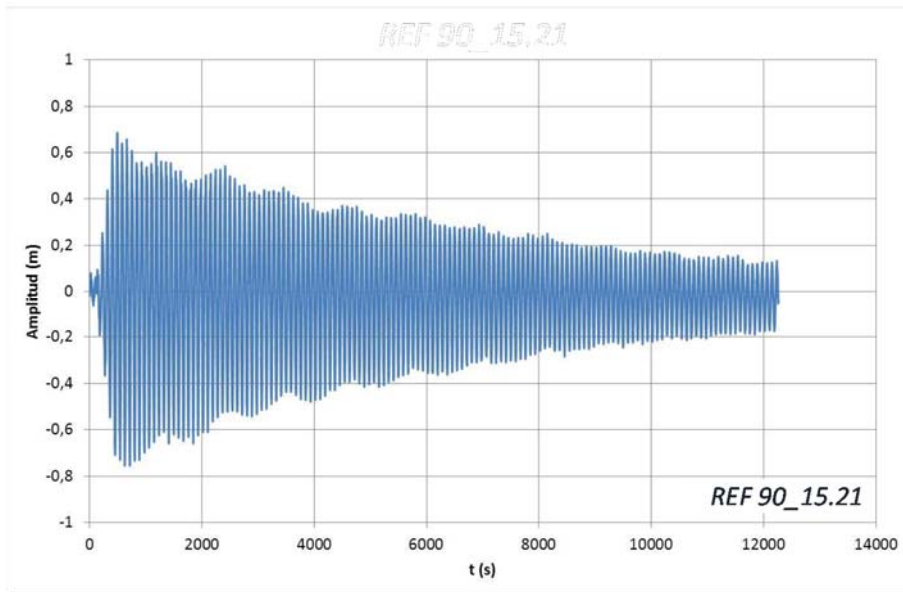


Figura A-1.15. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

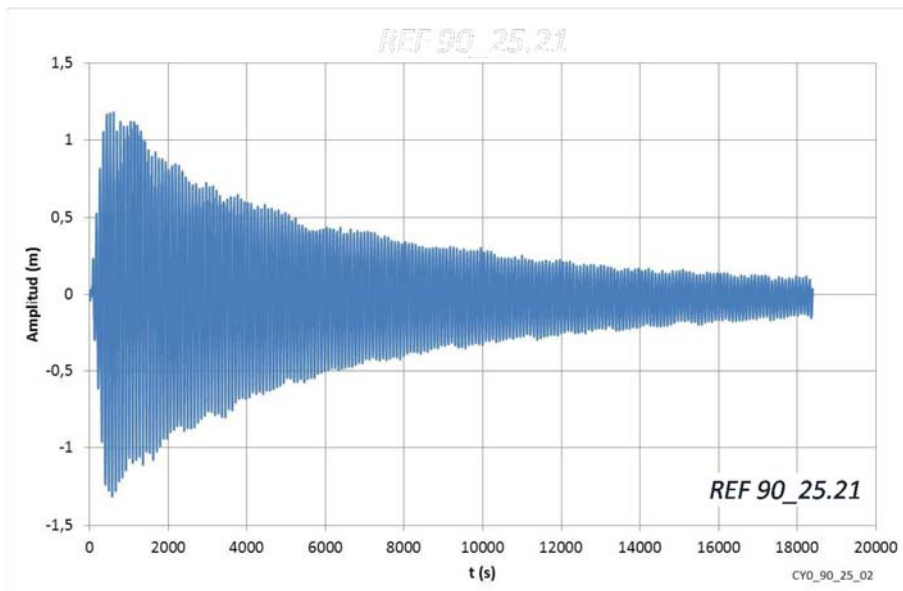


Figura A-1.16. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

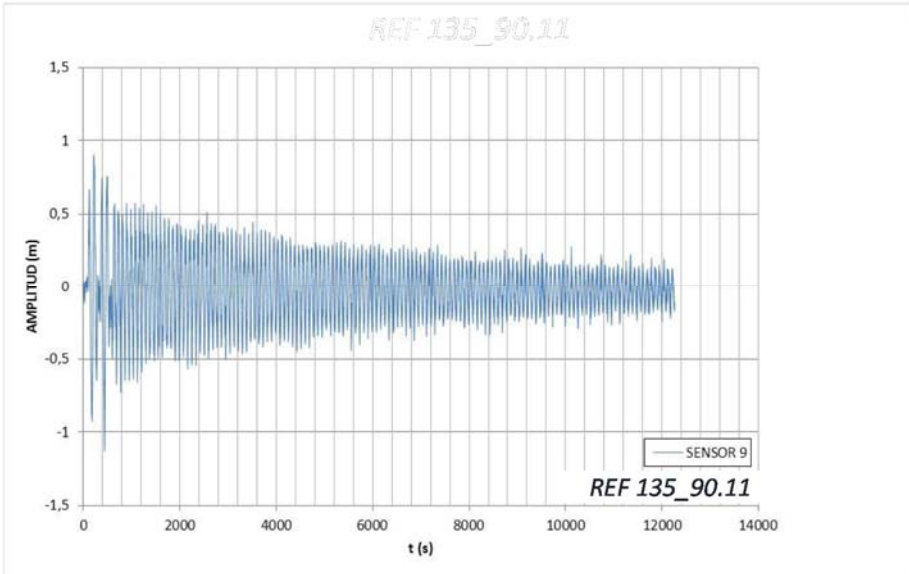


Figura A-1.17. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección vertical completamente impermeable, ensayada con $T=135s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

VIII.3.2. Estructuras ARJ-R con dos circuitos disipativos

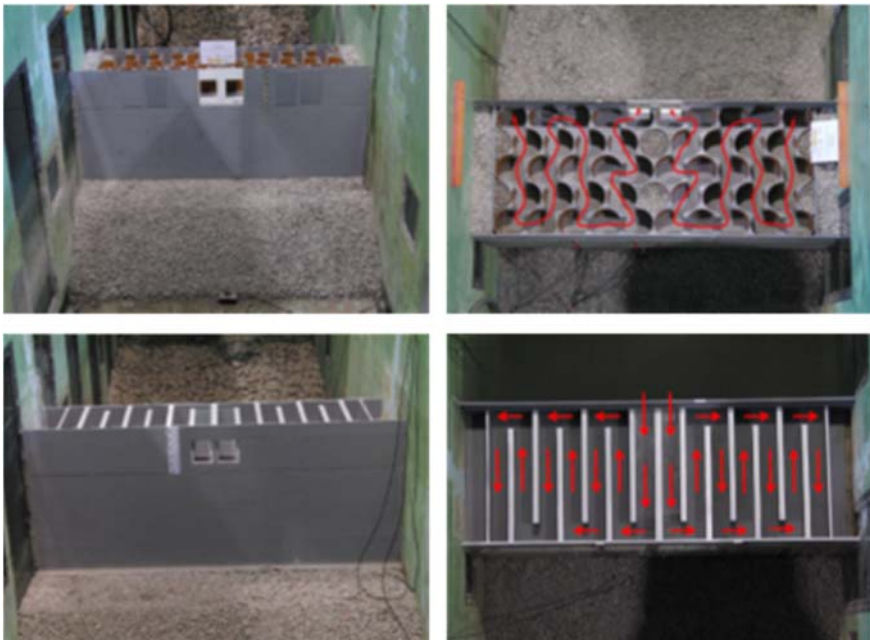


Figura A-1.18. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 2 circuitos.

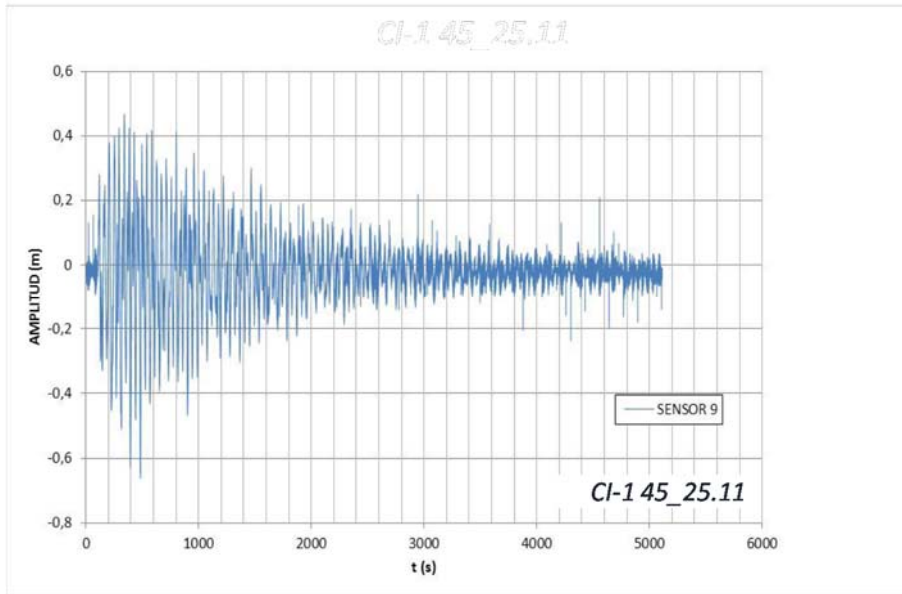


Figura A-1.19. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

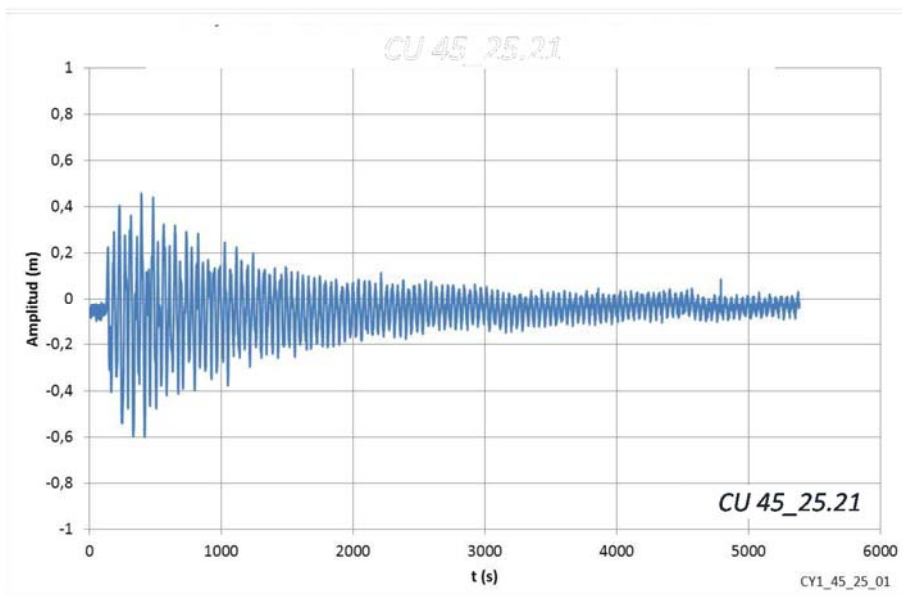


Figura A-1.20. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

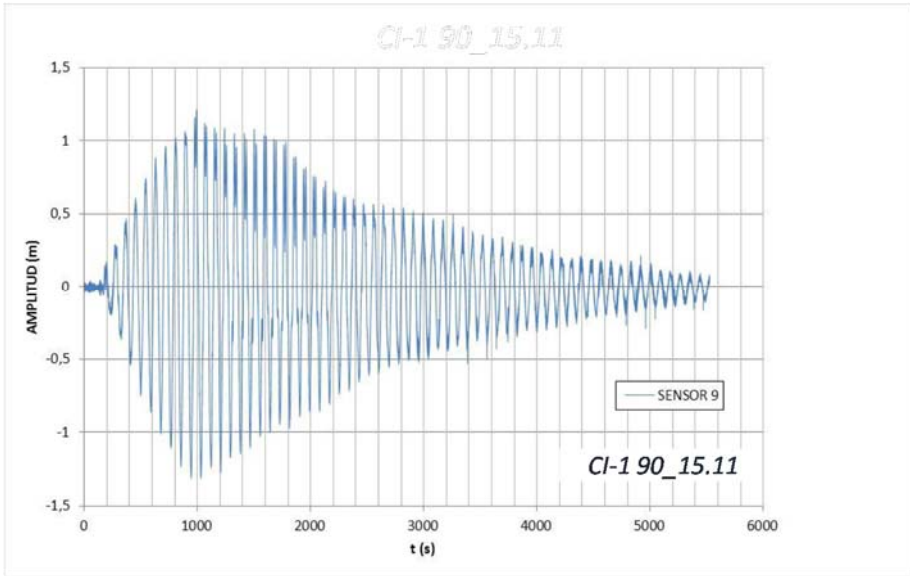


Figura A-1.21. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

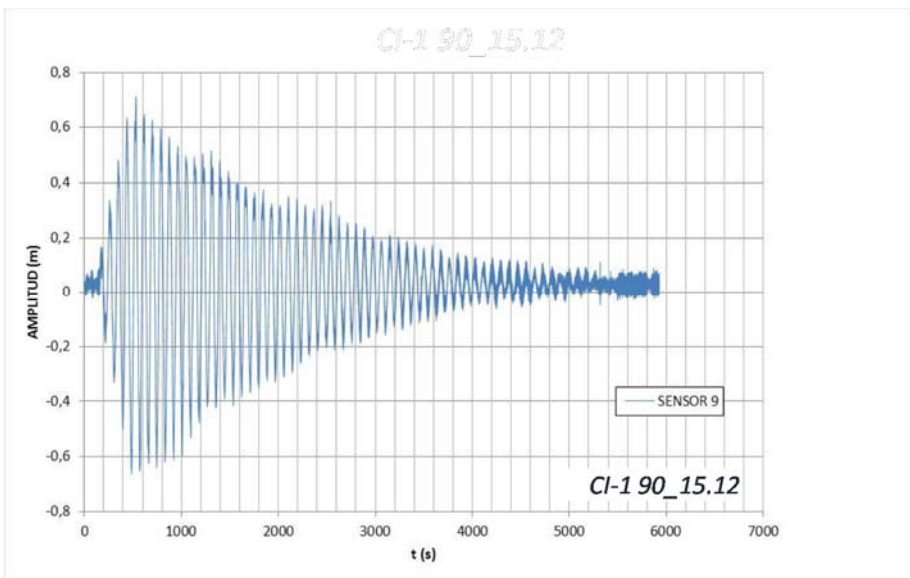


Figura A-1.22. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

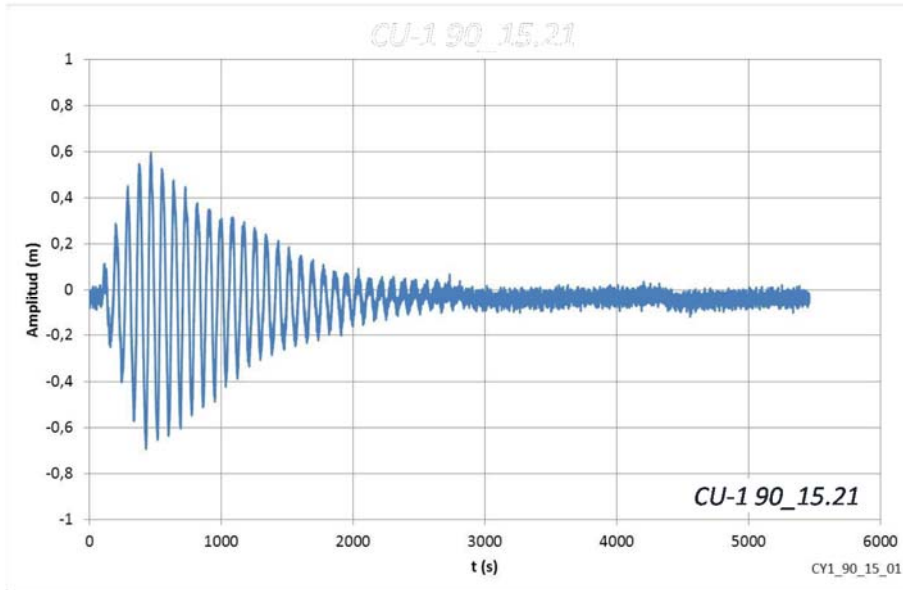


Figura A-1.23. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

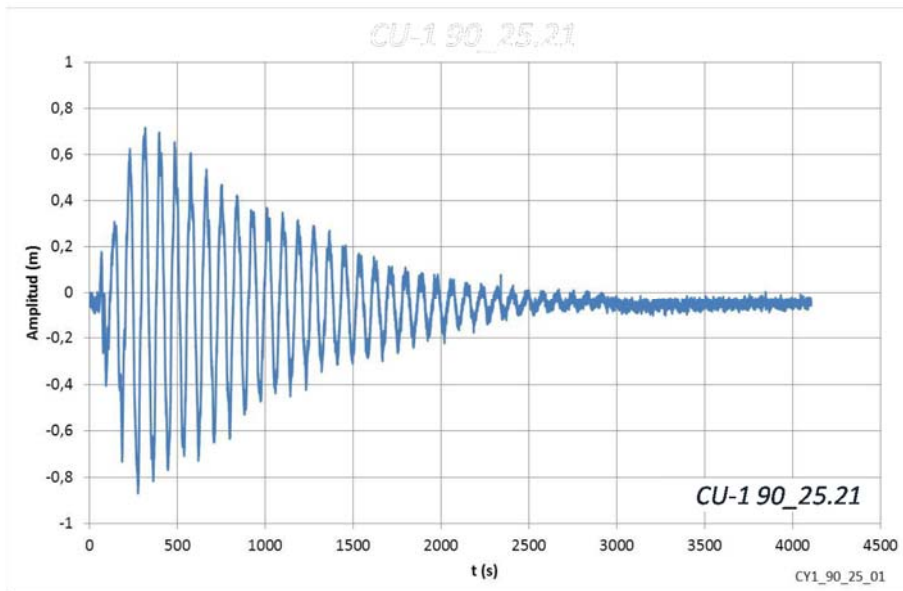


Figura A-1.24. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

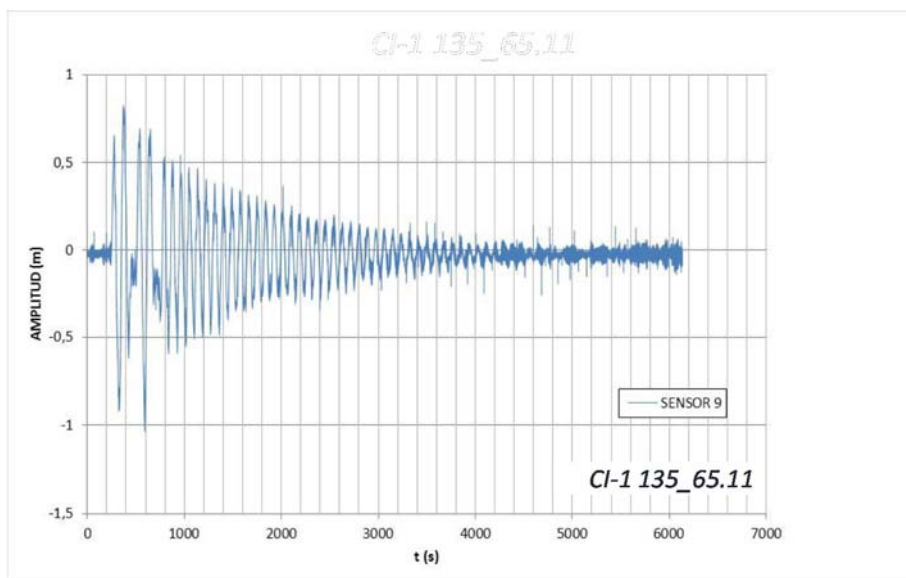


Figura A-1.25. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 2 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=135s$ y una amplitud del 65% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

VIII.3.3. Estructuras ARJ-R con cuatro circuitos disipativos



Figura A-1.26. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 4 circuitos.

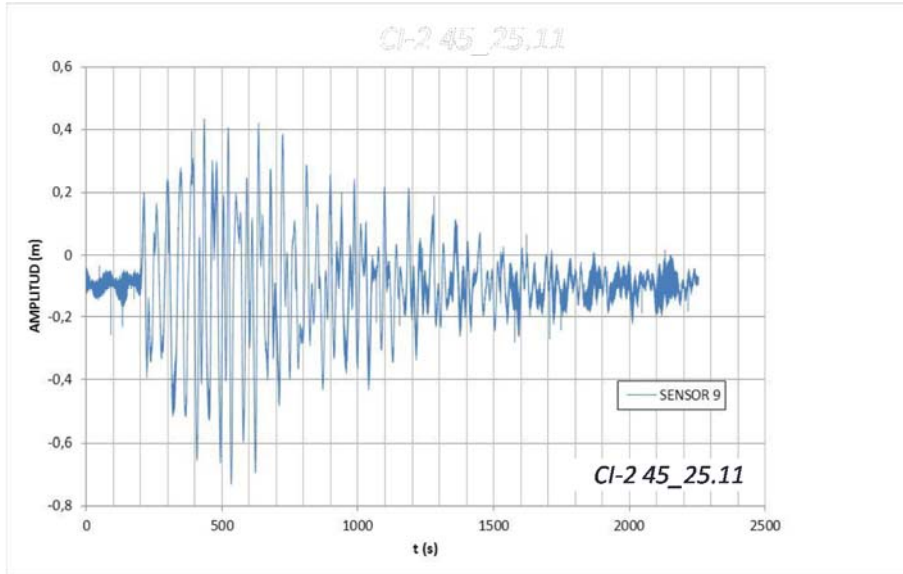


Figura A-1.27. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

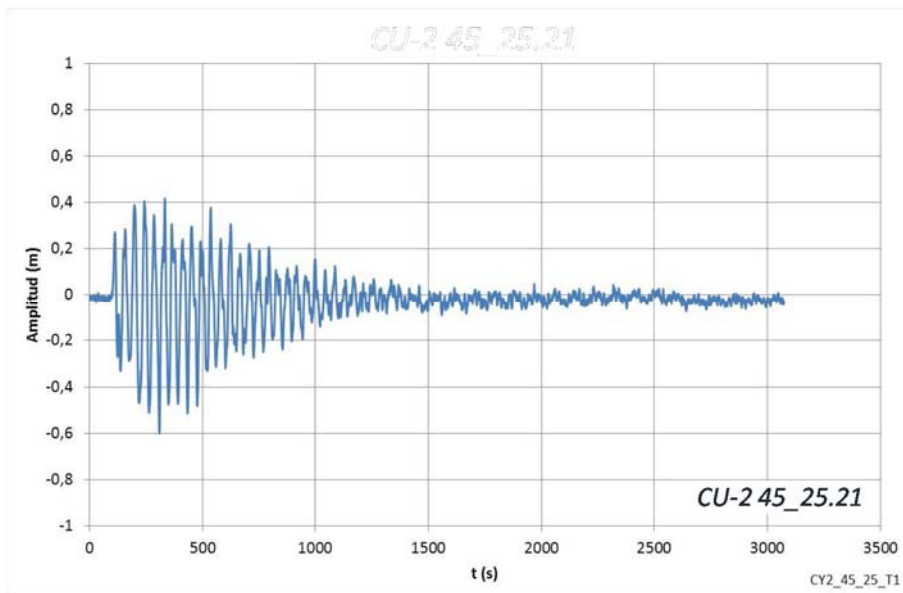


Figura A-1.28. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

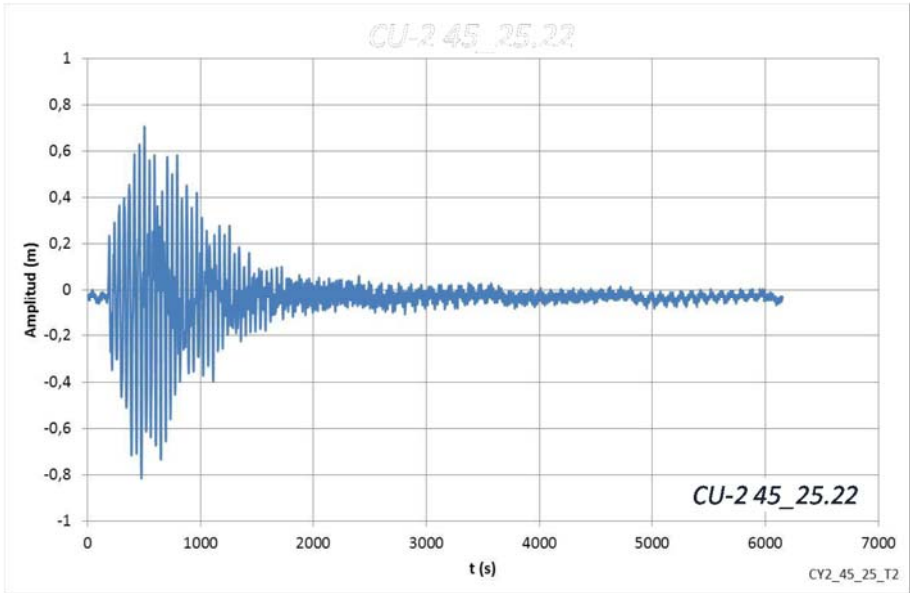


Figura A-1.29. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

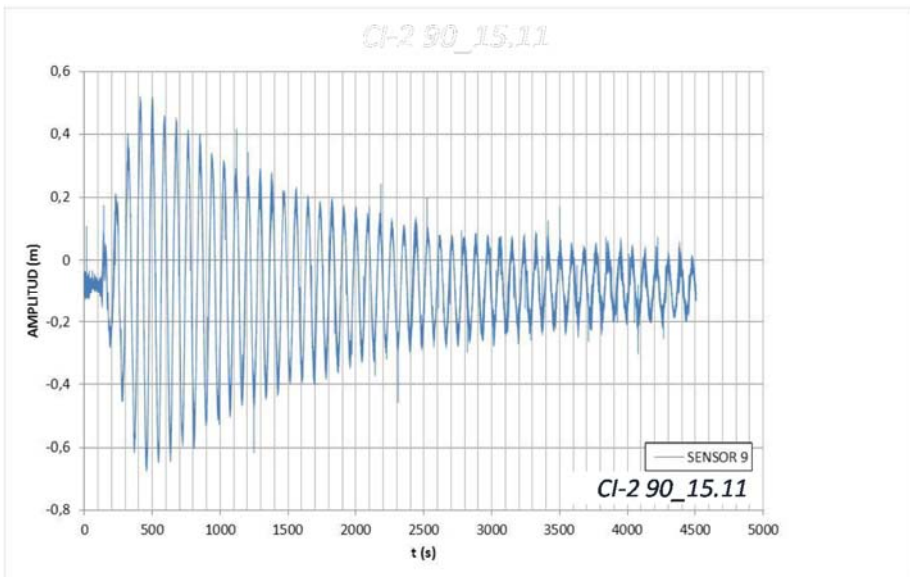


Figura A-1.30. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

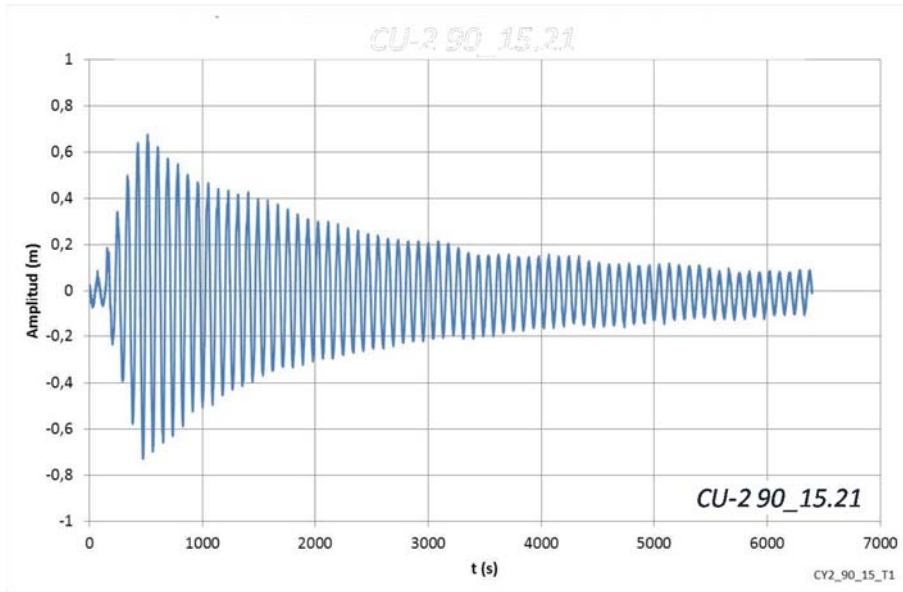


Figura A-1.31. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

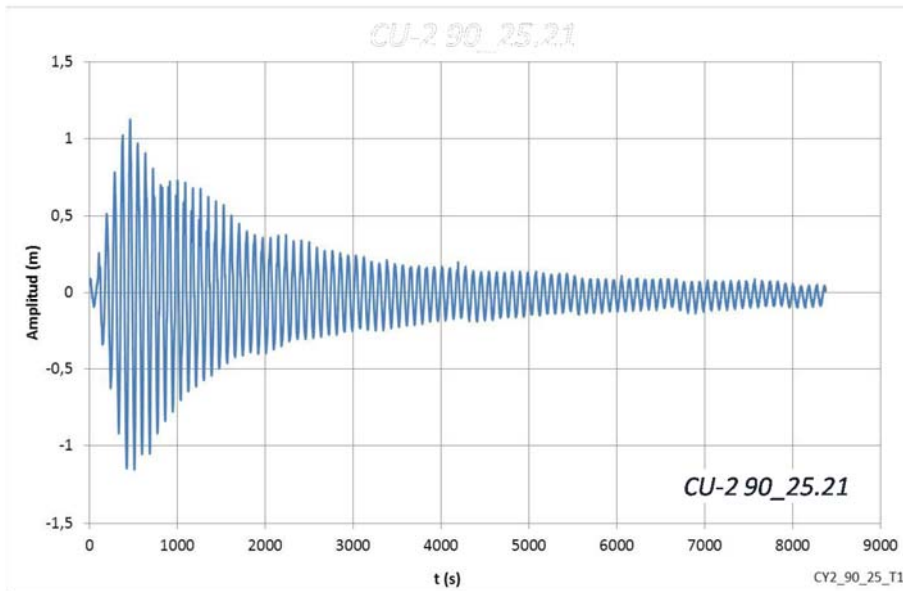


Figura A-1.32. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

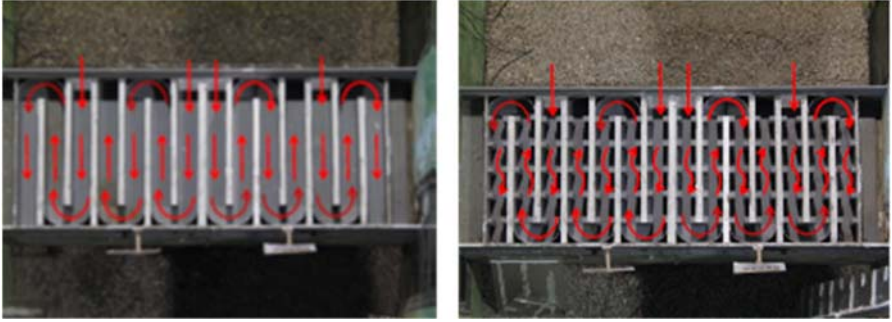


Figura A-1.33. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 4 circuitos, con modificación de la geometría en los cambios de sección incorporando formas curvas (izquierda) y elementos disipadores de energía (derecha).

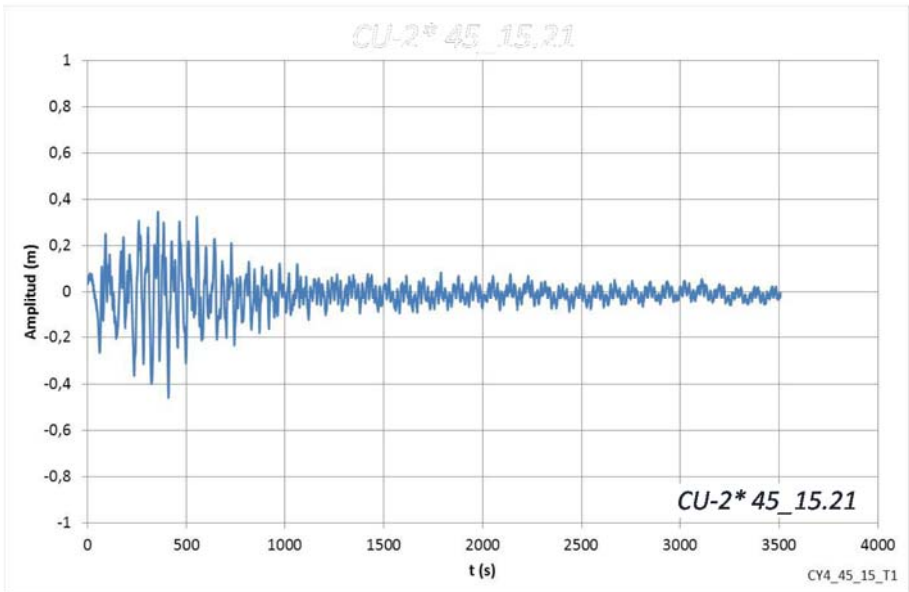


Figura A-1.34. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

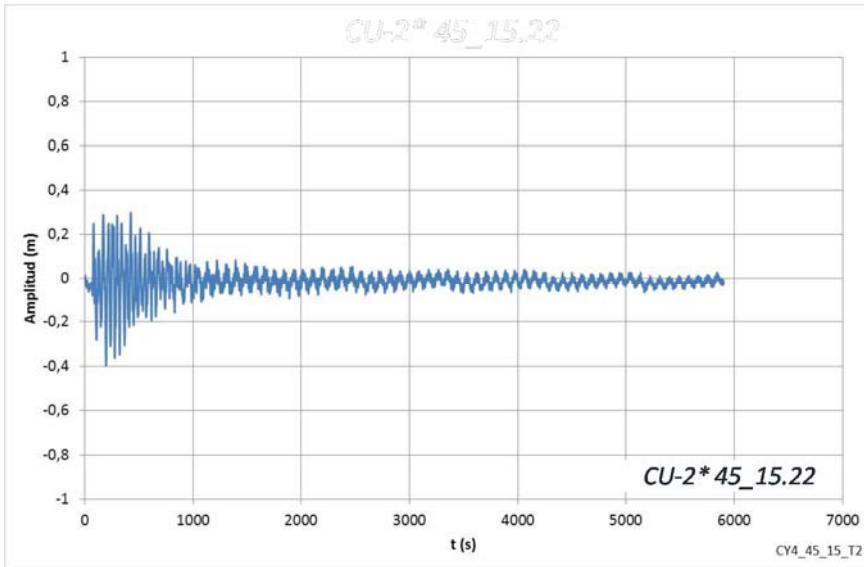


Figura A-1.35. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

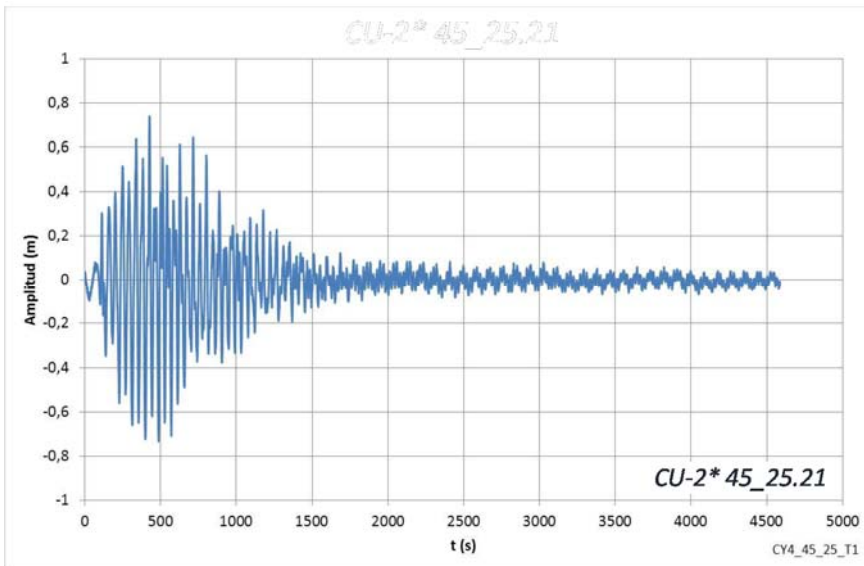


Figura A-1.36. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

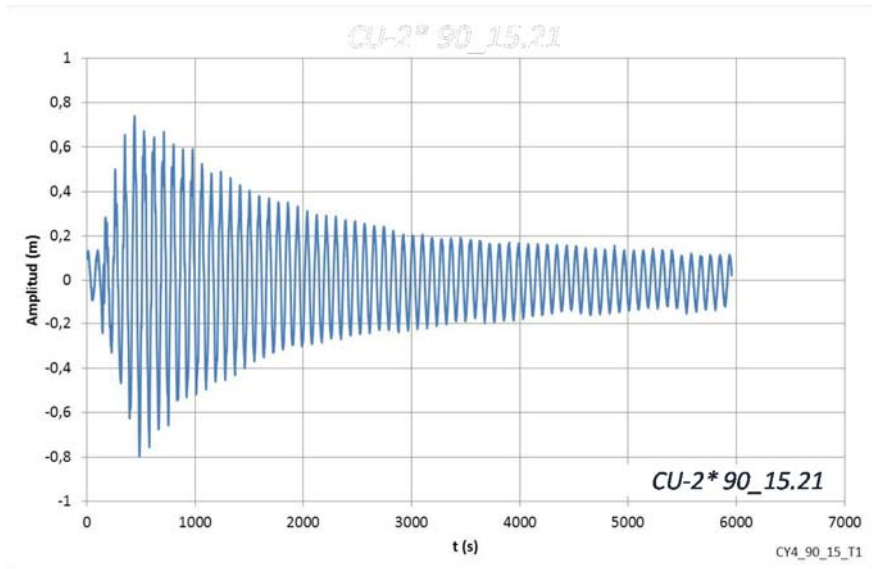


Figura A-1.37. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

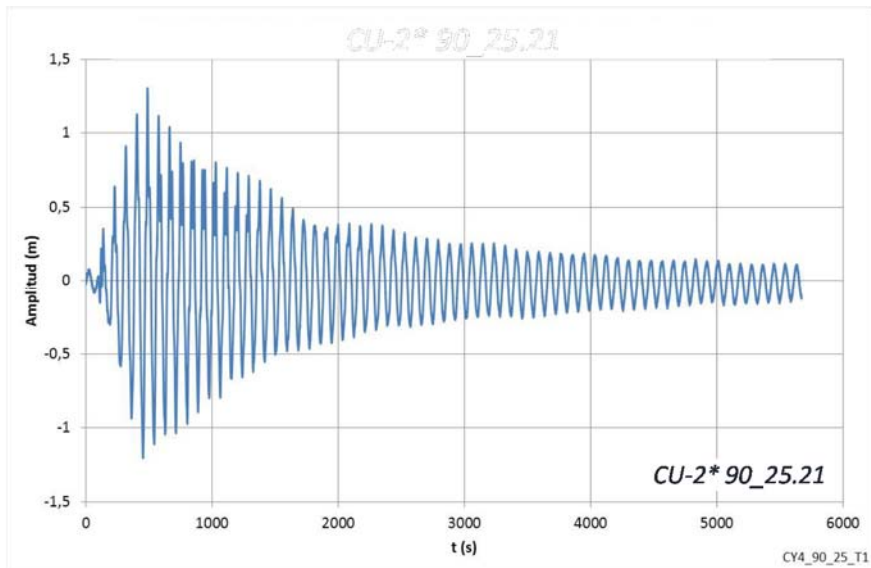


Figura A-1.38. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

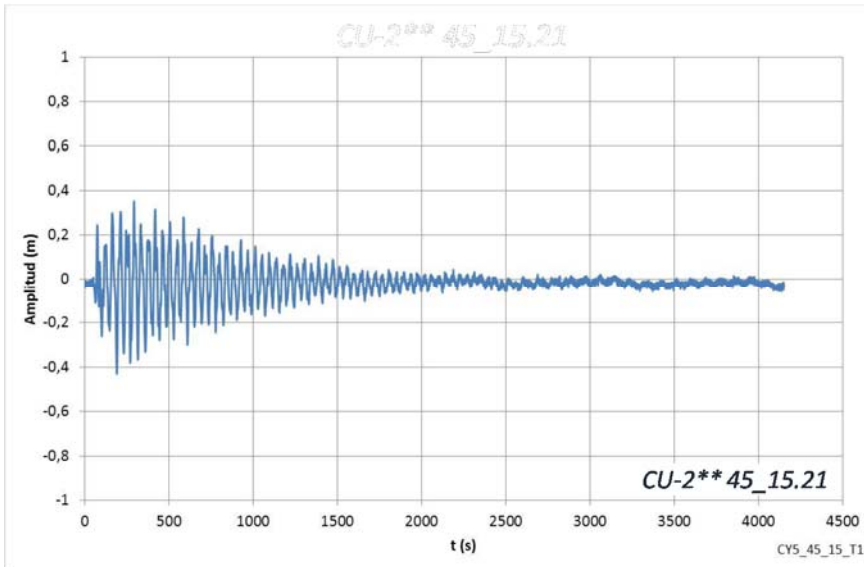


Figura A-1.39. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

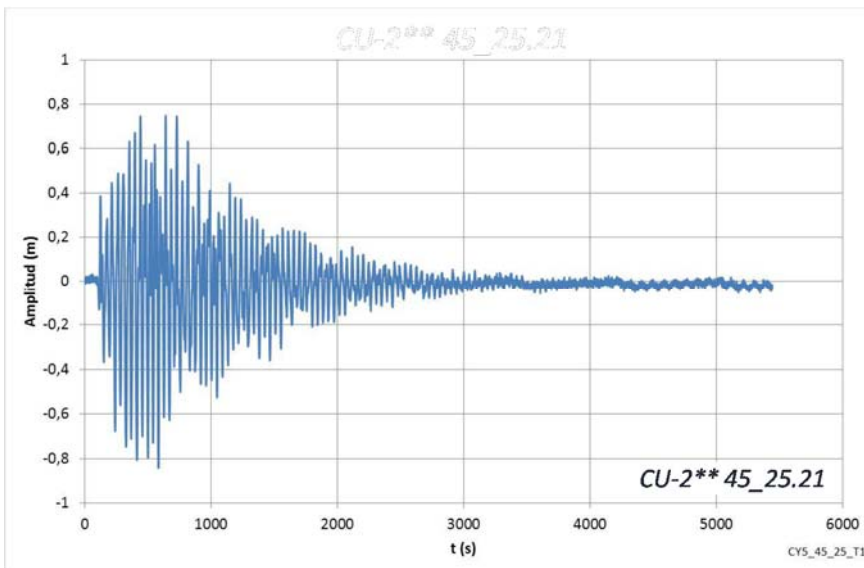


Figura A-1.40. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

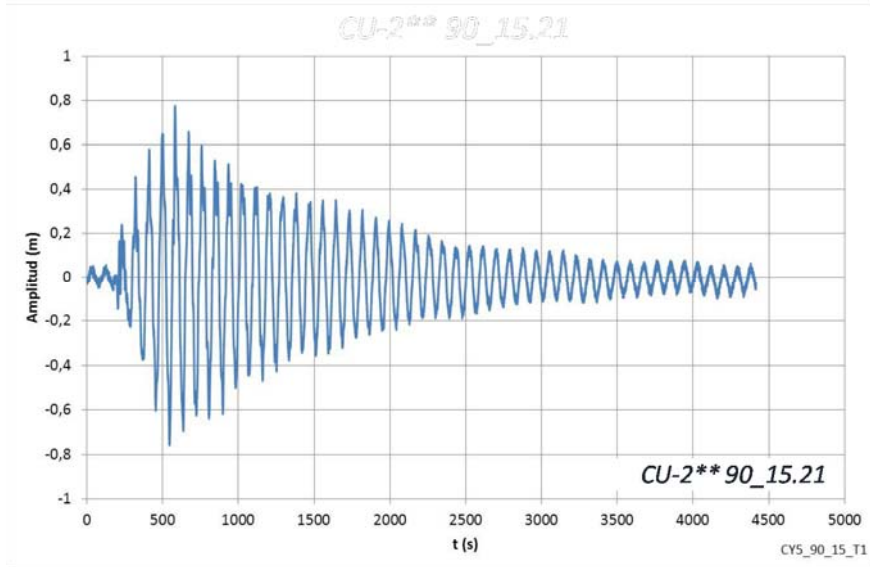


Figura A-1.41. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

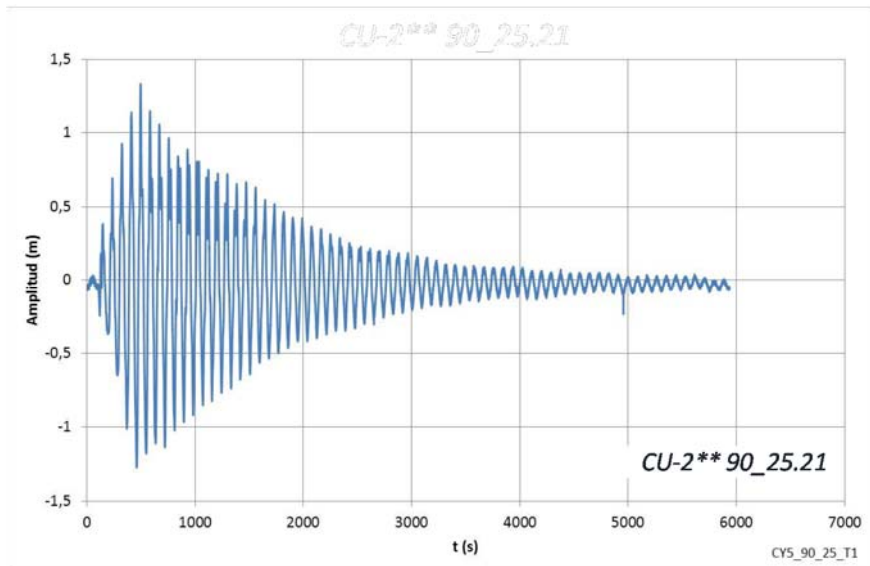


Figura A-1.42. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 4 circuitos rectangulares, incluyendo curvas en los cambios de dirección y resaltos, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

VIII.3.4. Estructuras ARJ-R con seis circuitos disipativos



Figura A-1.43. Modelo a escala 1/11.6 de las estructuras ARJ-R de 6 circuitos.

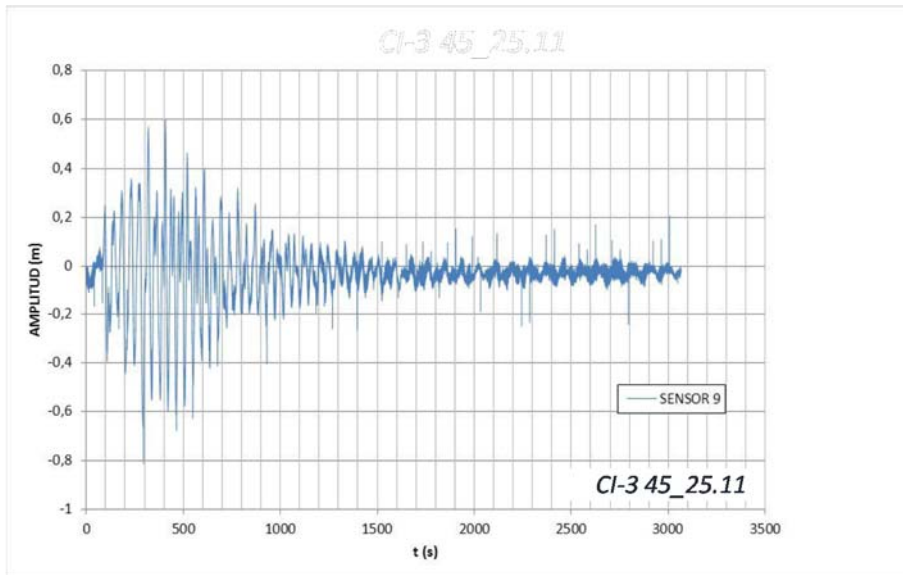


Figura A-1.44. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

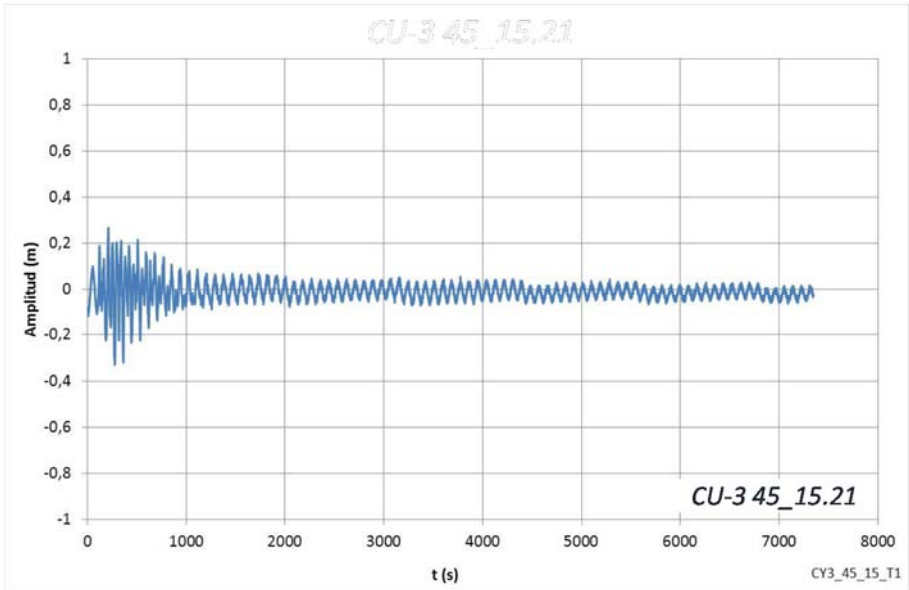


Figura A-1.45. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

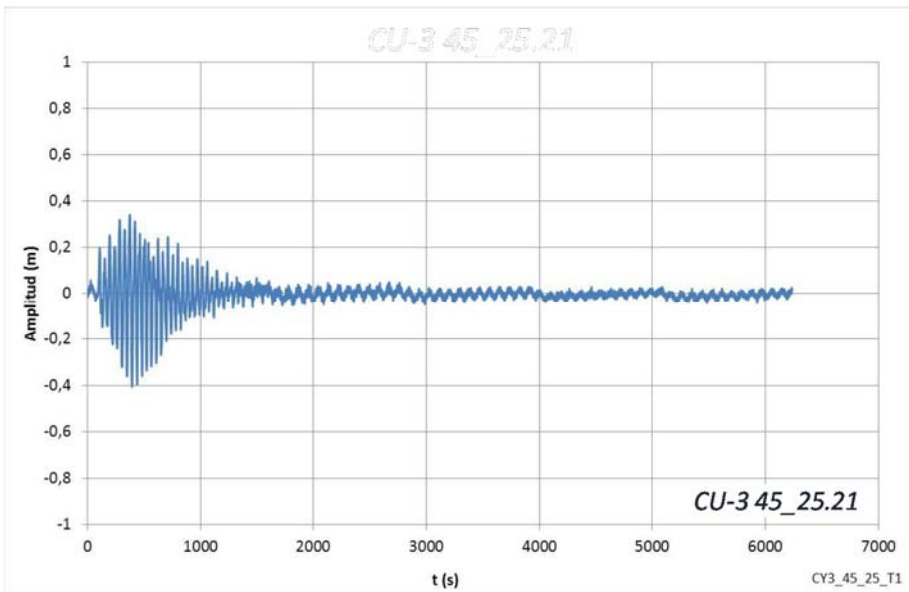


Figura A-1.46. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=45s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

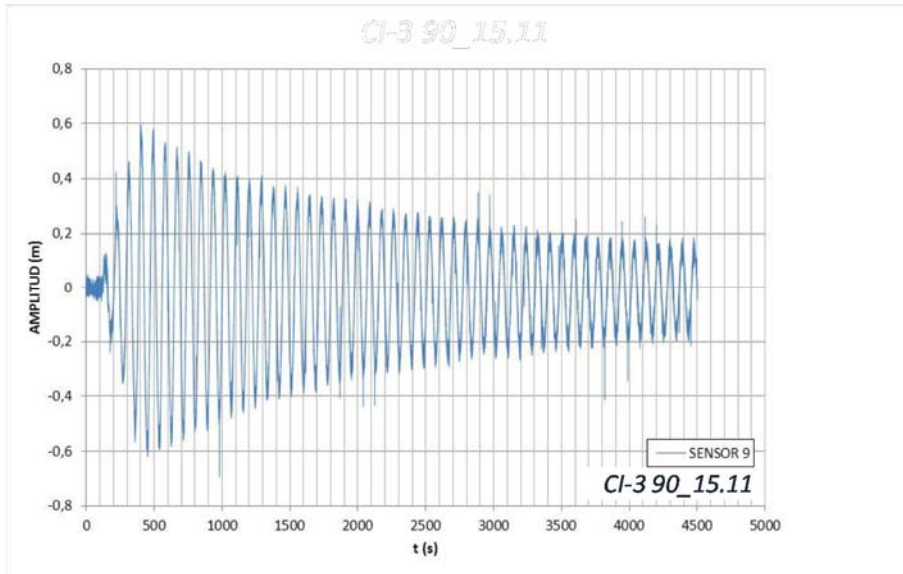


Figura A-1.47. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

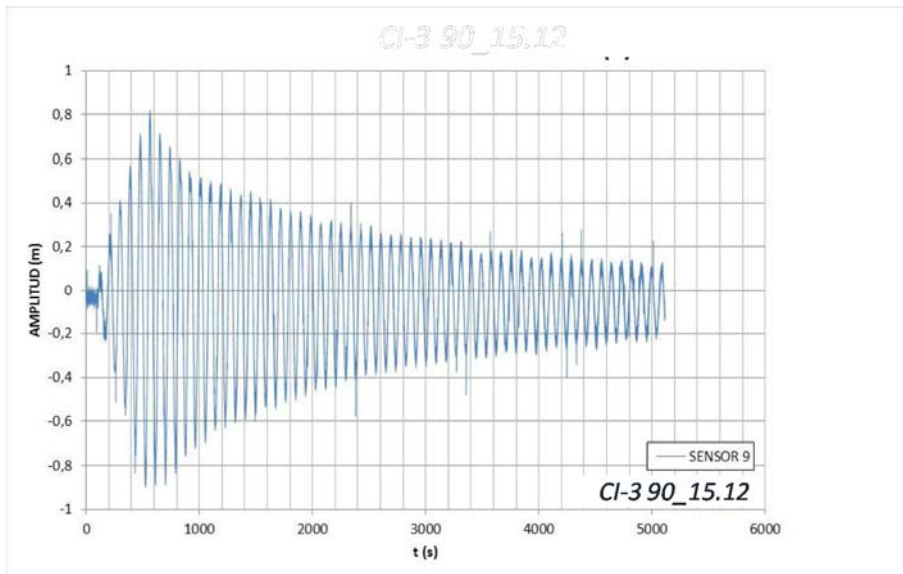


Figura A-1.48. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos de celdas circulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas (R).

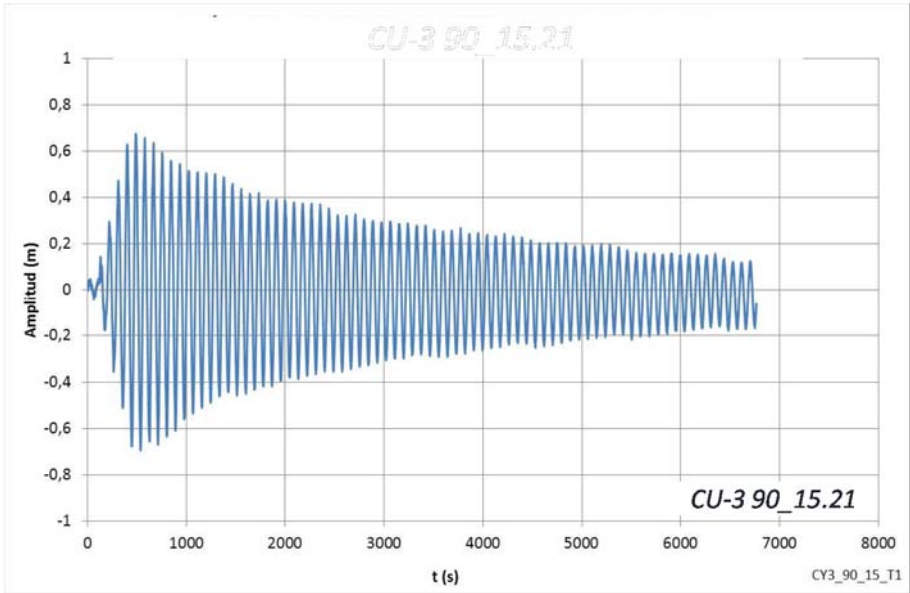


Figura A-1.49. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 15% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

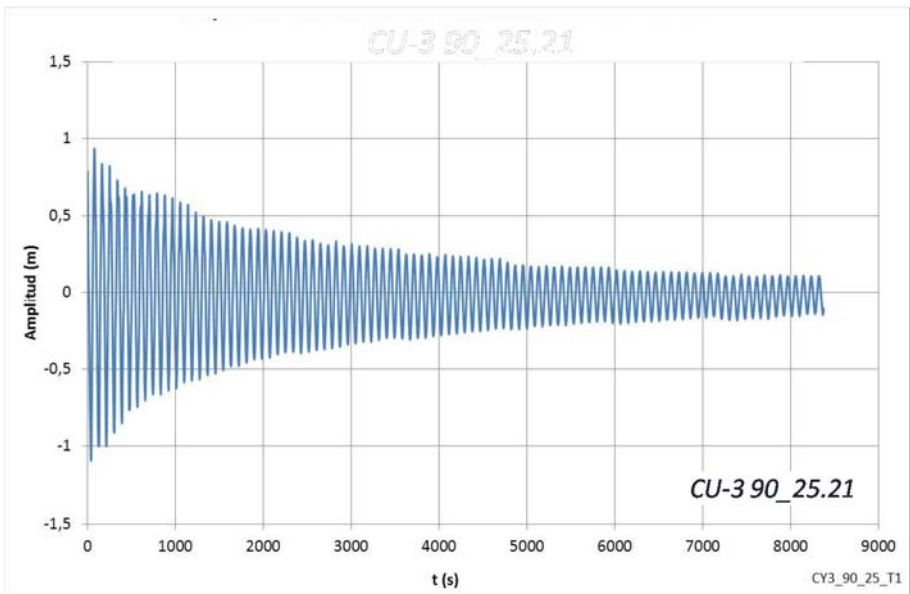


Figura A-1.50. Serie temporal de la evolución de la superficie libre para la sección ARJ-R con 6 circuitos rectangulares, ensayada con $T=90s$ y una amplitud del 25% en el movimiento de la pala generadora de ondas.

VIII.4. Gráficas de ajuste exponencial de la energía en la fase de amortiguación de las SRR.

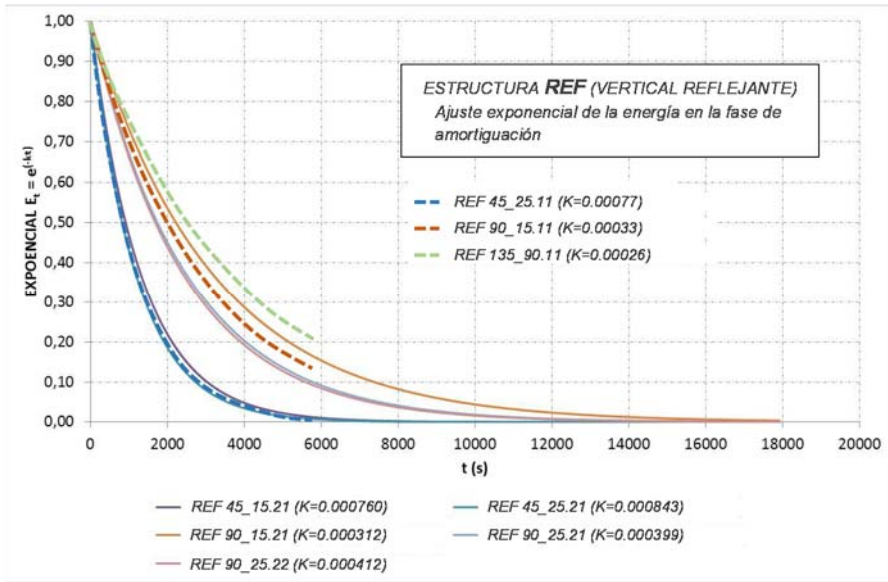


Figura A-1.51. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante REF.

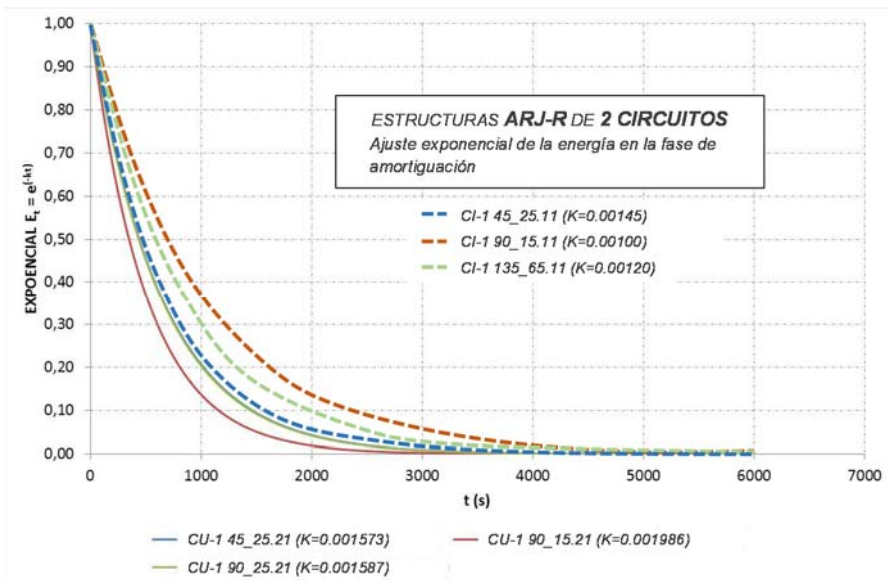


Figura A-1.52. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 2 circuitos disipativos.

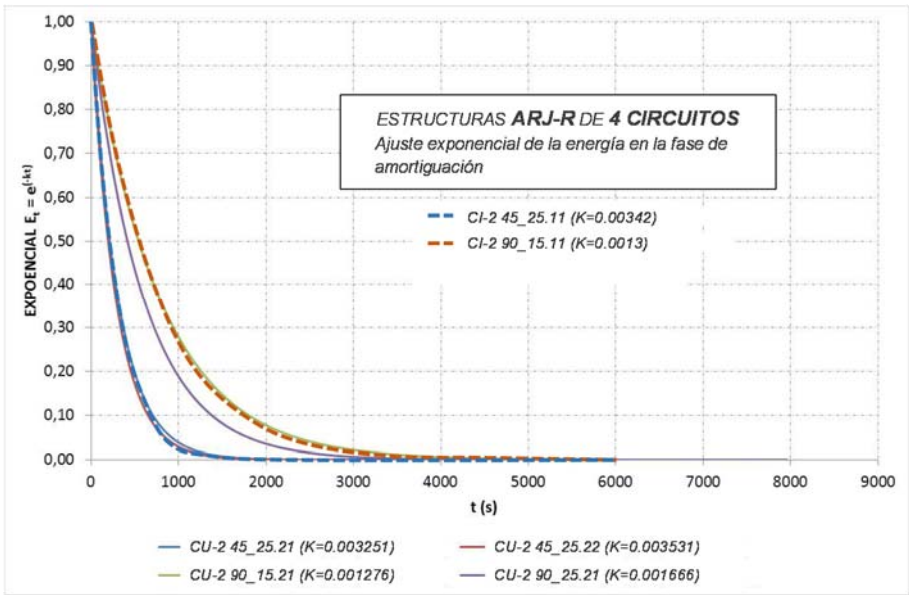


Figura A-1.53. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos.

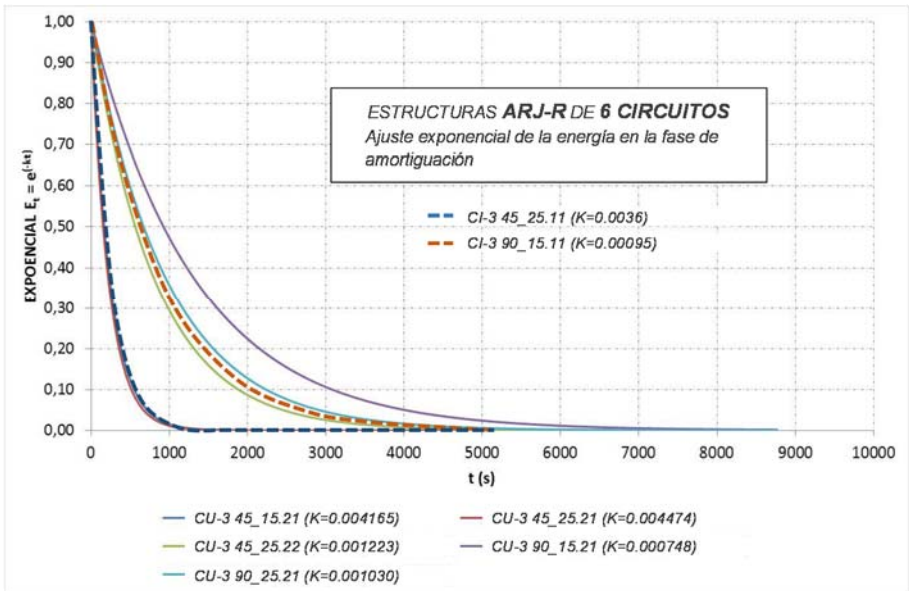


Figura A-1.54. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 6 circuitos disipativos.

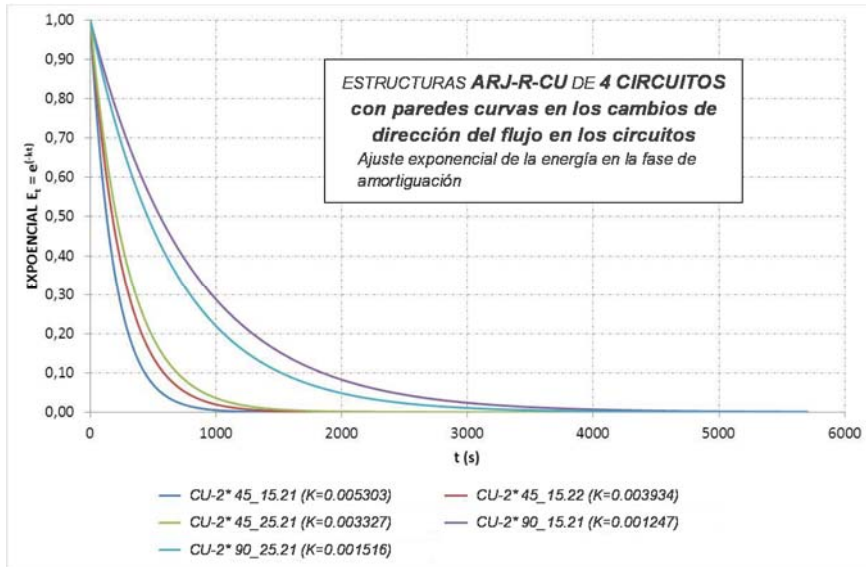


Figura A-1.55. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos incluyendo paredes curvas en los cambios de dirección en los circuitos.

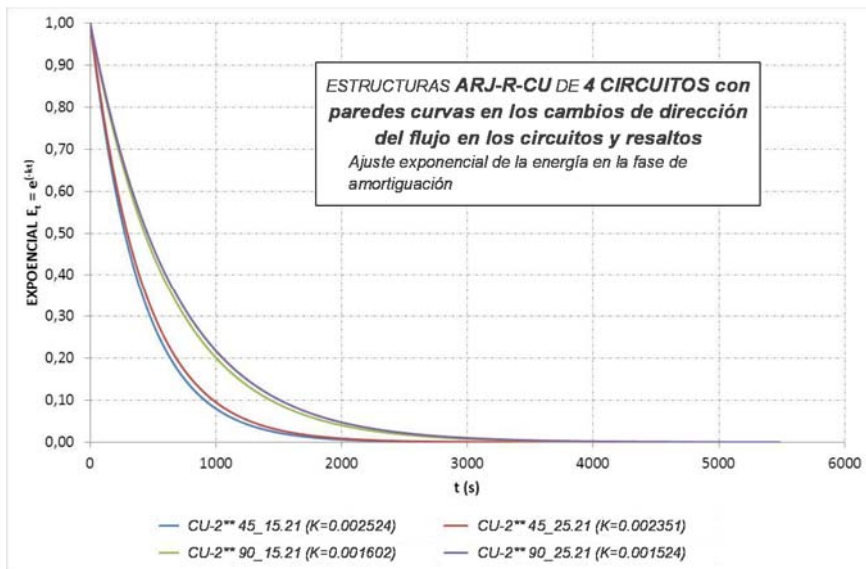


Figura A-1.56. Ajuste exponencial de la fase de amortiguación en los ensayos SRR para la estructura vertical reflejante ARJ-R con 4 circuitos disipativos incluyendo paredes curvas en los cambios de dirección y resaltos para provocar mayor disipación de energía en los circuitos.

Anejo 2

Publicaciones relacionadas con la tesis

Las principales publicaciones del autor relacionadas con la tesis, en orden cronológico inverso, son:

1. González-Escrivá, J.A. y Medina J.R. 2017. Evaluación de la atenuación de la resonancia en puertos mediante estructuras antirreflejantes. Resumen aceptado para comunicación oral en las XIV J. Esp. Ing Costas y Puertos.
2. González-Escrivá, J.A. y Medina J.R. 2012. Antirreflective vertical structure extended for attenuation of low frequency waves. *Coastal Engineering Proc.*, 33 (1), 9 pp.
3. González-Escrivá, J.A., Ripoll, E., Zarranz, G. y Medina J.R. 2011. Estudio de muelles antirreflejantes de baja frecuencia. *J. Esp. Ing Costas y Puertos Proc.*, 11, 12 pp.
4. Ripoll, E., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2010. Experimental study of wave absorbing-type elements on quay wall design, *Appl. Phys. Mod. Port and Coastal Prot. Proc.*, 3rd.
5. Garrido, J.M., Ponce de León, D., Berruguete, A., Martínez, S., Manuel, J., Fort. L., Yagüe, D., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2010. Study of new low-reflectivity quay wall caisson. *Coastal Engineering Proc.*, 32, 11 pp.
6. Geeraerts, J., Kortenhuis, A., González-Escrivá, J.A., de Rouck, J. y Troch, P. 2009. Effects of the new variables on the overtopping discharge at seep rubble mound breakwater-The Zeebrugge case. *Coastal Engineering*, 56, 141-153.
7. González-Escrivá, J.A., Zarranz, G., Ripoll, E., Moreno, C. y Medina, J.R. 2007. Elemento modular "GMAR" y bloque "ARPA" para muelles antirreflejantes, *J. Esp. Ing Costas y Puertos Proc.*, 9, 10 pp.
8. Kortenhuis, A., Oumeraci, O., Geeraerts, J., de Rouck, J., Medina, J.R. y González-Escrivá, J.A. 2004. Laboratory effects and other uncertainties in wave overtopping measurements. *Coastal Engineering Proc.*, 29, 13 pp.

A continuación se reproduce íntegramente la publicación nº2.

ANTIREFLECTIVE VERTICAL STRUCTURE EXTENDED FOR ATTENUATION OF LOW FREQUENCY WAVES

J.A. Gonzalez-Escriva and J.R. Medina¹

A new maritime vertical structure based in the concept of multi-cell circuit (Medina et al., 2010) is presented to improve the antireflective performance for wave reflection of wind waves and oscillations associated with intense storms, resonance waves in port basins, etc. The large-scale laboratory results show a good performance of the multi-cell caisson tested, with less than 28% time for a 50% reduction in energy compared to the conventional one. Reflection coefficient is estimated for short waves in the range 65% to 90% increasing as frontal openings increase.

Keywords: vertical structure; antireflective; low frequency waves, multiple unit wave chambers, cell circuits

INTRODUCTION

Conventional vertical maritime structures with vertical faces are highly reflective structures whose wave energy amplification makes port operation difficult or even impossible. Because this phenomenon is conditioned by incident waves, port geometry and depth, any wave climate changes, port enlargements or dredging will modify the wave energy in the port area.

To attenuate wave reflection and the corresponding energy amplification in the nearby basin or floating area, a various structures have been designed, being Jarlan-type structures (Jarlan, 1961) the most widely used (see Fig. 1). A Jarlan-type structure consists of a perforated chamber which dissipates, basically, the wave energy by turbulence, friction and phase delay between the wave reflection on the front wall and the impermeable back wall. Jarlan-type structure experiments have been widely reported in the literature for short waves (wave period, T , less than 25 s), their results revealing a maximum antireflective efficiency for structures with an antireflective zone width, B , almost a quarter of the wavelength, L , being even more effective with a multi-chamber design ($B_1+B_2>B$).

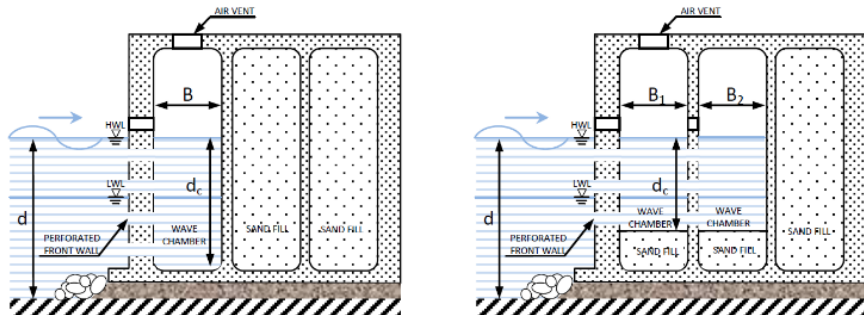


Figure 1. Jarlan-type structure with a) one chamber (left), b) two chambers (right).

However, all the existing antireflective solutions for vertical maritime structures have the drawback of their exiguous efficacy to reduce the reflection of low frequency waves ($T > 25$ s). Low frequency basin oscillation is an infrequent but serious port problem and especially difficult to solve once the structure is in place. If the results for short waves could be applied to low frequency waves, the inadequateness of Jarlan-type solutions when facing low frequency waves would derive from the fact that the incident wave has a first reflection on the seawall-facing wall of the structure and the last reflection on the inner-end wall reached by the flow; if the roundtrip time of the flow between the frontal wall and the back wall is much less than one half of the incident wave period, the antireflective effectiveness is quite small. Therefore, a large space is needed for the antireflective zone which means high construction costs.

¹ Laboratory of Ports and Coasts, Universidad Polit cnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

To overcome this technical problem, the design of a vertical structure can be based on a multi-cell circuit concept (Medina et al., 2010) which is considered to be especially effective to reduce the wave reflection of wind waves and oscillations associated with intense storms, resonance waves in port basins, etc., in vertical maritime structures with standard structure widths and construction methods.

THE CONCEPT OF MULTI-CELL CIRCUIT

The concept of a multi-cell circuit was developed in the CADIMA "Design and Adaptability of Conventional Caisson for Antireflective Breakwater and Quay Construction" research project (Martinez et al., 2010). This project allowed scientists, contractors and consultancy engineers to analyze not only the possible design solutions but their feasibility in the real world.

A circuit is defined as the space or pathway travelled by the flux of waves through a dissipation chamber from the incident point to the partial dissipation and/or exit from the attenuation system as a function of the established chamber characteristics. The constitution of large circuits in different directions within a caisson implicitly involves the horizontal separation of one circuit from the others, forcing the flux of water to be conducted along the circuit. The length of the dissipating chamber is then determined by the route length of the wave flow within the dissipating chamber between the frontal wall and the back wall, or half the length of the circuit of units if the chamber has two frontal openings and does not have a back wall.

Earlier studies have resulted in a design based on the multi-cell circuit concept, which includes different dissipation chambers that will implement the technical effect of Jarlan-type structures. As a novelty, the different dissipating chambers are extended horizontally forming circuits of several cells, along different directions, thus extending the pathway of the circulation of the flow induced by the waves and increasing the antireflectiveness for the lowest frequency waves (Garrido et al., 2010) without enlarging the width of the structure. Additionally, the design based on the multi-cell circuit offers a practical solution from the constructive point of view, as well as being economically viable (Martinez et al., 2010).

Assuming that the optimum technical antireflective effect of the Jarlan-type structure obtained ($B \approx L/4$) is applicable to low frequency waves, the use of the multi-cell circuit concept could provide an effective width for the antireflective zone, B_{eff} , about $L/4$, equal to the length of the dissipating chamber, and higher than the caisson width.

As a result, having circuits of multiple units with longer or shorter lengths with the same antireflective zone width in breakwaters and quays, makes it possible to obtain optimum specific designs adapted to the local conditions in each stretch of the construction. For instance, the caissons used in a breakwater of a commercial port may have long circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the most frequent and most intense wave storm in the year, which usually cause the port to be closed; the caissons used in quays more exposed to the wind waves which penetrate through the port entrance may have shorter circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the wave storms which cause the maximum inner port agitation every year and finally, the caissons located in the most sheltered areas of the port may have much longer circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the long waves associated with the wave groups of the storms, the port basin resonance and other low frequency waves. In other words, instead of being forced to use in practice the same solution for all situations, dissipating chambers with multiple units allow adequate wave reflection reduction in each stretch of the breakwater or quay of a port without enlarging the width of the antireflective zone.

New design: Low frequency antireflective *cyes-R* caisson

Based on the multi-cell circuit concept, a caisson for antireflective quays was designed for low frequency attenuation ($40 \text{ s} < T < 200 \text{ s}$) related to port resonance phenomenon. Fig. 1 represents the cross section of the *cyes-R* caisson in typical Mediterranean conditions, while Fig. 2 depicts a general view of the pathways defined by the circuits.

The two openings on the seaward-facing wall of the structure allow water to enter into the dissipation chambers defined by the interconnected cells. The water pathways extend horizontally forming circuits of 23 cells with more than two changes in the direction of circulation and with the length of each dissipation chamber being greater than the width of the antireflective zone of the structure.

LOW FREQUENCY WAVE ABSORPTION ANALYSIS OF THE *cyes-R* CAISSON

In general studies, to identify the possible low frequency oscillations and wave energy amplification produced by reflection consider the wave climate, port geometry including antireflective features and water depth. While very simple geometries can be estimated in theoretical studies, numerical and physical scale models can provide useful data for more complex sheltered areas. However, the reflection coefficient of each maritime structure is needed, typically obtained using physical scale experimentation in laboratory.

Moreover, studies of the features of an antireflective structure exposed to low frequency waves have additional shortcomings:

1. Complex wave generation, due to the length of the waves that would require large strokes for the wave paddle or reduced wave paddle velocity beyond the usual ranges.
2. The inability of wave reflection analysis to separate incident and reflected waves when the wavelength is longer than the flume length.
3. Viscous phenomena, which could result in scale effects in small-scale models. Large-scale models are required because there is no previous research done in this area.
4. The lack of experimental methodology or analytical techniques previously reported in the literature, so both initially must be developed.

To this end and in order to validate the new design with a new experimental methodology and analytical technique, in this research, experiments were conducted with a large-scale model, and specific requirements were proposed.

Experimental methodology and specific requirements of the facility and scale model

A new methodology was established to assess the effectiveness of the a new vertical maritime structure against low frequency waves. Each test had an initial accumulative process in terms of energy which was achieved by generating small amplitude waves with a period equal to the period of the main resonance modes of the basin created between the wave paddle and the maritime vertical structure. The wave generation was stopped before the accumulative process made the water level exceed the crest of the caisson or when the wave height remained stable without an increase in energy. The subsequent damping process was measured to record any significant reduction in energy.

In Fig. 4, the solid line depicts the expected amount of accumulated energy (measured in terms of the sum of square water heights, ΣH^2) of the conventional (impermeable) vertical structure, and the broken line represents the expected energy time variation for the antireflective *cyes-R* caisson. Theoretically, in an ideal system with no friction and no water leakage, the energy increases as the wave paddle moves, stopping growth as the paddle does, the wave energy remaining constant for the conventional vertical structure and diminishing for the antireflective solution.

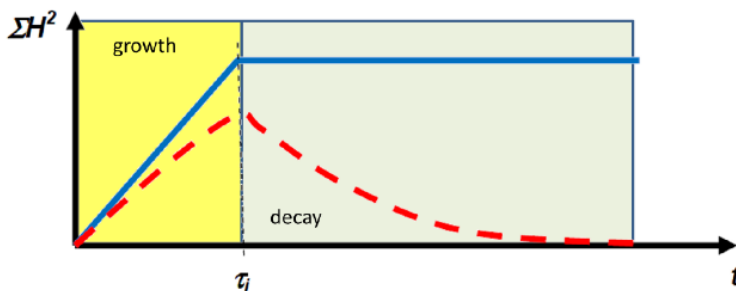


Figure 4. Expected energy time series in the low frequency experiments of the conventional vertical structure and the antireflective *cyes-R* caisson (ideal system).

Besides the effect of the antireflective structure, in laboratory experiments, friction with side walls, bottom, structure toe, wave paddle, etc., is expected to contribute to reducing energy in the same way for both structures. Thus, the decay of the conventional vertical structure, as a reference, and the antireflective structure can be used to compare the antireflective features of the new solution.

The facility must meet special requirements and a scale model is needed to implement the new experimental methodology and analysis:

- to avoid viscous scale effects, the flow inside the antireflective structure model must be turbulent for non-breaking conditions (a scale of 1/12 was calculated as the minimum for the range of velocities to be tested).
- to prevent leakages, the wave paddle must be watertight.
- to guarantee that all the energy is contained within the volume limited between the wave paddle and the vertical maritime structure (laboratory basin), all the elements were sealed to avoid water leakage including the floor, walls and rubble foundation, so that the decay process depended only on the antireflective structure and the friction to the walls and floor of the flume.
- to allow the accumulation of energy in the laboratory basin, the active absorption systems must be disconnected.
- to produce the maximum resonance, wave periods must be coincident to the resonance periods for the flume limited by the wave paddle and the model. Wave heights must be of small amplitude to prevent early overtopping.
- no overtopping is accepted as reducing energy in the system.

Large-scale testing

2D experiments were carried out in the large wave flume (90 m long, 3.6 m wide and 6.0 to 4.5 m deep) in the Centre for Ports and Coastal Studies of the CEDEX (Centre for Public Works Studies and Experimentation). Tests were conducted with a 1/11.6 large-scale model of the caisson *cyes-R* (A), and with two additional vertical antireflective caissons *cyes-R* (D and T), represented in Fig. 5 and an impermeable one, all founded on a rubble mound structure (see Fig. 2).

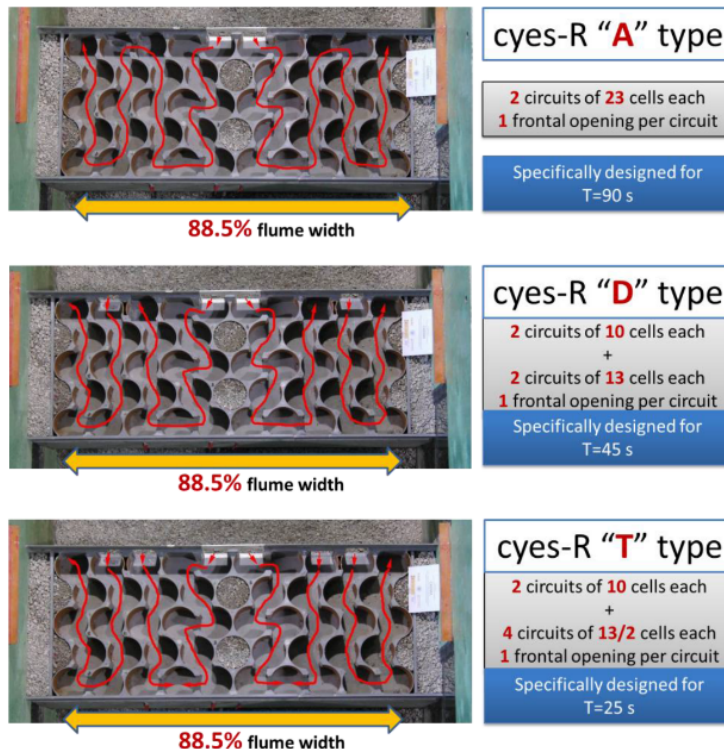


Figure 5. Typologies tested for the antireflective *cyes-R* caisson.

The facility at the CEDEX fulfills all the methodological requirements: the wave paddle is watertight; the scale is larger than 1/12, and the active absorption system can be disconnected. The model and bottom of the flume were sealed to become watertight. The water was not allowed to pass through the model to the back side of the flume. Fig. 6 shows that neither wave paddle nor model had water leakages.



Figure 6. Absence of water leakages: a) wave paddle with interior face completely dry (left), b) model of the *cyes-R* with water on the left and dry (right).

Irregular and regular conventional short wave tests were conducted along with the specific low frequency tests for a better characterization of the *cyes-R* antireflective features even for wave conditions that they surely will be exposed to but that were not included in the design. Table 1 specifies the test matrix used.

Type of tests	Parameters	Typology tested			
		conventional	<i>cyes-R</i> (A)	<i>cyes-R</i> (D)	<i>cyes-R</i> (T)
Low frequency	Wave period, T	45 s, 90 s and 135 s (natural resonance periods of the laboratory basin)			
	Wave height, H Water level, WL	0.7 m and 1.2 m 0			
Short waves	Wave period, T _p	6 s, 10 s and 20 s			
	Wave height, H Water level, WL	0.7 0			

The instrumental sketch is depicted in Fig. 7. Two groups of three resistance wave gauges each were located by the wave paddle and another between the bottom slope and the model. One ultrasound wave gauge was located by the first group of resistance wave gauges; three were located by the second group and two by the model. In addition to the instruments assembled, two video cameras were installed to record all the experiments.

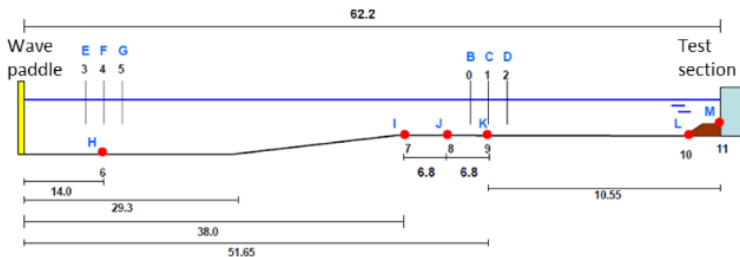


Figure 7. Experimental sketch. Vertical lines = resistance wave gauges. Red dots = ultrasound wave gauges.

Large-scale results

Basic spectral analysis was performed corroborating energy accumulation in the resonant modes (45 s and 90 s). Fig. 8 shows an example of the results for the low frequency test with $T=135$ s.

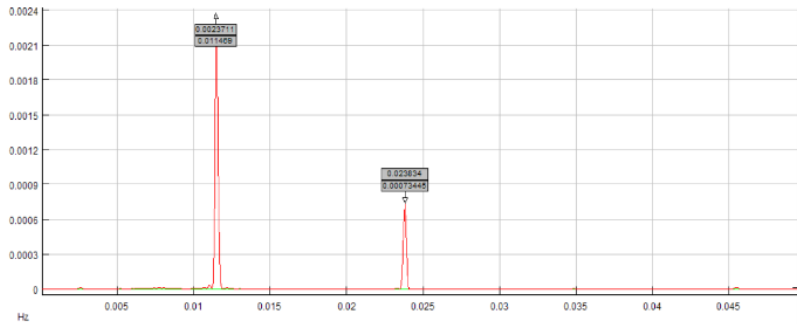


Figure 8. Energy spectrum of a low frequency test with $T=135$ s.

Typical measurements of a wave gauge in the vicinity of the vertical structure for the resonant period $T=90$ s are depicted in Fig. 9 for the four typologies tested. As expected, the *eyes-R* (A) caisson, which was specifically designed to be optimum at that period, appears the most effective in absorbing wave energy, while the conventional vertical structure features very low energy damping over time. A close-up view of the elevation time series for the *eyes-R* (A) is compared to conventional vertical structure in Fig. 10.

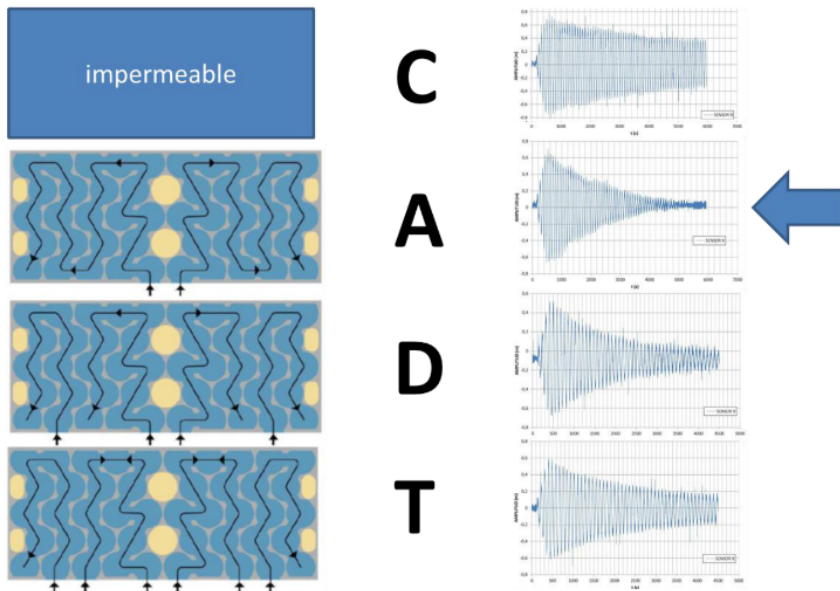


Figure 9. Time series of water elevations for the low frequency tests with $T=90$ s for the four typologies tested.

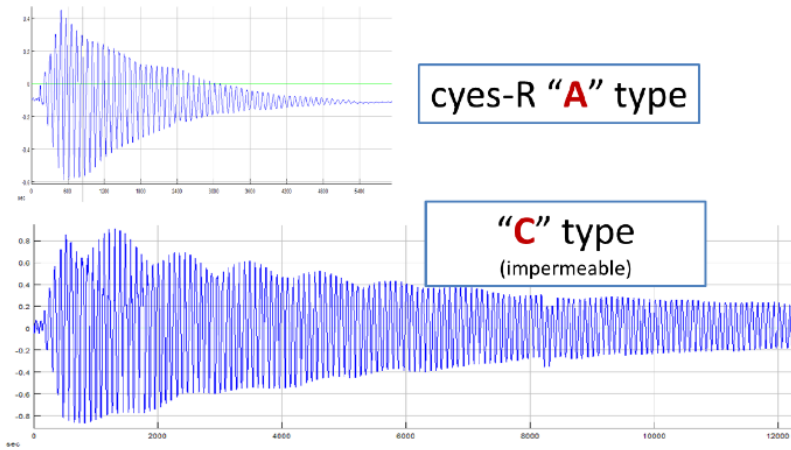


Figure 10. Time series of water elevation for the low frequency tests with $T=90$ s, of the *cyes-R* (A) caisson (upper graph) and for the conventional vertical section (lower graph).

Wave energy in the time domain can be estimated with the square of the water elevation smoothed with a Barlett triangular window. Two wave amplitudes per typology and per period are depicted in Fig. 11 for each of the four typologies tested. Again, large differences in the decay are observed for the antireflective *cyes-R* caissons compared to the conventional vertical structure.

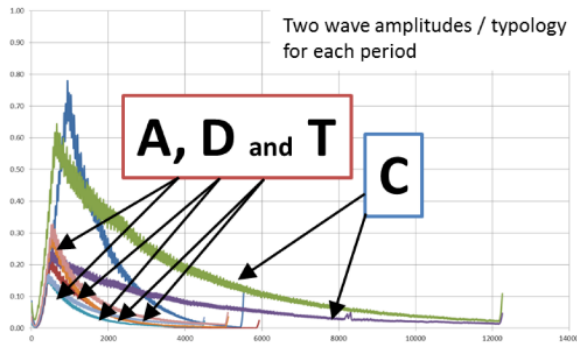


Figure 11. Time series of the estimated wave energy for the low frequency tests with $T=90$ s.

Exponential energy decay can be used to obtain the time required for a 50% reduction in energy compared to the energy when the decay started (“half energy life”). The results of the half energy life (in prototype seconds) for the low frequency wave experiments are represented in Table 2.

Table 2. Half energy life for the typologies and periods tested.				
LF period, T	Typology tested			
	conventional	<i>cyes-R</i> (A)	<i>cyes-R</i> (D)	<i>cyes-R</i> (T)
45 s	903 s	477 s	203 s	206 s
90 s	2100 s	693 s	533 s	730 s
135 s	2666 s	578 s	-	-

For the short waves tested, reflection coefficients from 60 to 90 % were obtained. Increasing the openings in the frontal face of the caisson improved the antireflective effectiveness for short waves.

CONCLUSIONS

Port basin resonance due to quay reflection, associated to low frequency waves ($40 \text{ s} < T < 200 \text{ s}$), is an uncommon but still unsolved problem. The concept of multi-cell circuit extended the best antireflective B/L results in standard Jarlan-type caissons which were subjected to low frequency waves (by enlarging the effective width of the antireflective zone, B_{eff}). Moreover, the quay design can be adapted to achieve the adequate wave reflection reduction in each stretch of the vertical structure or port without enlarging the width of the structure.

Based on the multi-cell circuit, the new antireflective solution for low frequency waves, *cyes-R*, is presented with long multi-cell circuits being created within the structure. These long circuits defined dissipation chambers with more than two changes in the direction of circulation and each one larger than the width of the antireflective zone of the structure (width of the structure as a maximum).

A new wave energy accumulation methodology was used to validate the effectiveness of the circuit-based solution in antireflective caissons under low frequency wave action. Each test had an accumulative process in terms of energy achieved through the generation of small amplitude waves (stopped smoothly before overtopping) with a period equal to the period of the main resonance modes of the experimental basin (volume limited between the wave paddle and the vertical maritime structure within the wave flume). Active absorption must be disconnected to allow accumulative process. Moreover, the elements limiting the volume of water between the wave paddle and the vertical maritime structure must be watertight including the floor, walls and rubble foundation (laboratory basin) to prevent energy dissipation other than that produced by the antireflective structure.

2D experiments were carried out in the large wave flume (90 m long, 3.6 m wide and 6.0 to 4.5 m deep) in the Centre for Ports and Coastal Studies of the CEDEX (Centre for Public Works Studies and Experimentation) testing a 1/11.6 large-scale model of the caisson *cyes-R* (A) as well as two additional vertical antireflective caissons *cyes-R* (D and T) and an impermeable one, all founded on a rubble mound structure.

The laboratory results show a good performance of the multi-cell caisson tested, with a time for a 50% reduction in energy compared to the energy when the decay started ("half energy life") less than 3.5 times for the caisson *cyes-R* (A) compared to the conventional one.

Reflection coefficient, K_r , is estimated for short waves in the range $65\% < K_r < 90\%$ increasing as frontal openings increase.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors received support from the CADIMA (2009-2011) project, sponsored by to the Spanish Ministries of Development, Science and Innovation. The authors are grateful to Dr. Debra Westall for revising the manuscript.

REFERENCES

- Garrido, J., D. Ponce, A. Berruguete, S. Martinez, J. Manuel, L. Fort, D. Yagüe, J.A. Gonzalez-Escrivera, and J.R. Medina. 2010. Study of Reflection of New Low-Reflectivity Quay Wall Caisson, *Proceedings of 32nd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 466-480.
- Jarlan, G. E. 1961. A perforated vertical breakwater, *The Dock and Harbour Authority*, Vol. 21, nº486, 394-398.
- Martinez, S., J. Manuel, D. Yagüe, J. Garrido, D. Ponce de Leon, A. Berruguete, J.A. Gonzalez-Escrivera and J.R. Medina. 2010. Designing a New Low-Reflexivity Quay Wall Caisson, *Proceedings of the 32nd PLANC Congress*, 949-963.
- Medina, J.R., J.A. Gonzalez-Escrivera, L. Fort, S. Martinez, D. Ponce de Leon, J. Manuel, D. Yagüe, J. Garrido and A. Berruguete. 2010. *Vertical Maritime Structure with Multiple Chambers for Attenuation of Wave Reflection*, International PCT/EP2010/068000, EPO, The Hague, 23 pp.

Anejo 3

Patentes relacionadas con la tesis

Las patentes obtenidas relacionadas con la tesis (en orden cronológico inverso) son:

1. Medina, J.R., González-Escrivá J.A., Fort, L., Martínez, S.M., De los Dolores, C., Ponce de León, D., Manuel, J., Yagüe, D., Garrido, J.M. y Berruguete, A. 2016. Vertical Maritime Structure with Multiple Chambers for Attenuation of Wave Reflection, EP 2504496 (B1). European Patent Office, Bulletin 2016/26, 29.06.2016.
2. Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009. Elemento modular antirreflejante. ES 2 299 394 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 17.12.2009.
3. Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009. Bloque antirreflejante. ES 2 301 403 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 17.12.2009
4. Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R. 2009. Dique antirreflejante. ES 2 301 402 (B2). Patente nacional, fecha anuncio concesión 27.08.2009.

A continuación se reproducen las citadas patentes.

PATENTE N°1

Medina, J.R., González-Escrivá J.A.,
Fort, L., Martínez, S.M., De los Dolores, C., Ponce de León, D., Manuel,
J., Yagüe, D., Garrido, J.M. y Berruquete, A.

2016.

Vertical Maritime Structure with Multiple Chambers
for Attenuation of Wave Reflection,

EP 2504496 (B1). European Patent Office,
Bulletin 2016/26, 29.06.2016.

(11) **EP 2 504 496 B1**(12) **EUROPEAN PATENT SPECIFICATION**

(45) Date of publication and mention
of the grant of the patent:
29.06.2016 Bulletin 2016/26

(51) Int Cl.:
E02B 3/06 (2006.01)

(21) Application number: **10784294.0**

(86) International application number:
PCT/EP2010/068000

(22) Date of filing: **23.11.2010**

(87) International publication number:
WO 2011/064196 (03.06.2011 Gazette 2011/22)

(54) **VERTICAL MARITIME STRUCTURE WITH MULTIPLE UNIT CHAMBERS FOR ATTENUATION OF WAVE REFLECTION**

VERTIKALE MEERESKONSTRUKTION MIT KAMMERN MIT MEHREREN EINHEITEN ZUR ABSCHWÄCHUNG DER WELLENREFLEXION

STRUCTURE MARITIME VERTICALE COMPRENANT DE MULTIPLES CHAMBRES UNITAIRES AFIN D'ATTÉNUER LA RÉFLEXION DES VAGUES

(84) Designated Contracting States:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**

- **PONCE DE LEON CANTAVELLA, Daniel**
E-46013 Valencia (ES)
- **MANUEL ALONSO, Jose**
E-46013 Valencia (ES)
- **YAGÜE VALDIVIESO, Diego**
E-46013 Valencia (ES)
- **GARRIDO CHECA, Joaquín**
E-46013 Valencia (ES)
- **BERRUGUETE NAVARRO, Antonio**
E-46013 Valencia (ES)

(30) Priority: **24.11.2009 ES 200931049**

(43) Date of publication of application:
03.10.2012 Bulletin 2012/40

(73) Proprietor: **CYES MARITIME WORKS, S.L.**
46008 Valencia (ES)

(74) Representative: **Carpintero Lopez, Francisco
Herrero & Asociados, S.L.**
Alcalá 35
28014 Madrid (ES)

(72) Inventors:

- **MEDINA FOLGADO, Josep**
E-46013 Valencia (ES)
- **GONZALEZ-ESCRIVA, José Alberto**
E-46013 Valencia (ES)
- **FORT ALARCON, Lisardo Manuel**
E-46013 Valencia (ES)
- **MARTINEZ COLLADO, Silvia María**
E-46013 Valencia (ES)
- **DE LOS DOLORES BALAGUER, Camilo**
E-46013 Valencia (ES)

(56) References cited:

WO-A1-02/48464	ES-A1- 2 262 405
ES-A2- 2 048 055	FR-A5- 2 158 771
GB-A- 1 523 411	GB-A- 2 197 370
JP-A- 2000 144 674	NL-A- 7 306 025

EP 2 504 496 B1

Note: Within nine months of the publication of the mention of the grant of the European patent in the European Patent Bulletin, any person may give notice to the European Patent Office of opposition to that patent, in accordance with the Implementing Regulations. Notice of opposition shall not be deemed to have been filed until the opposition fee has been paid. (Art. 99(1) European Patent Convention).

DescriptionObject of the Invention

[0001] Within the field of port and maritime constructions, the invention provides a structure adequate for attenuation wave reflection, according to the preamble of claim 1.

[0002] The invention is applicable to conventional structures with a vertical exterior face, in other words to vertical maritime structures, including quays and vertical breakwaters. Specifically, the invention is applicable to quays and vertical breakwaters constructed using prefabricated reinforced-concrete caissons with lightened interior cells, referred herein as caissons-type structures, and quays made of concrete blocks, referred herein as block-type structures.

Background of the Invention

[0003] Conventional quays are maritime structures to berth ships and boats, having a vertical face with high wave reflection to waves coming from the harbor basin or floating area where the quays are placed. To attenuate the wave reflection and the corresponding energy amplification in the nearby basin or floating area, complementary constructive elements are added to the structure to reduce the wave reflection in the floating areas. These elements include slopes protected with quarry stones, beaches and piled supported quays with rock revetment. Furthermore, various typologies have been developed for low wave reflection elements which allow for an efficient reduction of wave reflection but present numerous problems, such as the poor effectiveness to attenuate the reflection of low frequency waves with large wave periods.

[0004] Thus, breakwaters are maritime constructions designed to reduce or to almost eliminate the transmission of the energy of wind waves, creating a sheltered area in which quays, berthing points, mooring points and other usable elements are placed. The fundamental typologies are the rubble-mound breakwater and the vertical breakwater. The rubble-mound breakwater creates the wave shelter by breaking the waves on the slope and producing low wave reflection. The vertical breakwater creates the wave shelter by reflecting the incident wave energy. The rubble-mound breakwater typology, with less wave reflection, is the most convenient for navigation and the environment; however, on high quality foundation soils, the vertical typology may reduce the construction costs, and avoid some of materials supply problems and environmental impacts, favoring the use of the vertical typology versus the rubble-mound typology. In order to minimize the drawbacks of the high wave reflection of the vertical breakwaters, analogously to the quays, over the years the addition of complementary constructive elements has been proposed. As in the case of quays, with vertical breakwaters the aim is to minimize the environ-

mental damages generated by the reflected waves to navigation and to the neighboring beaches.

[0005] Vertical maritime structures are being favored because of the need to exploit the harbor space to the limit and allow for the maximum port operative time. The present invention addresses such vertical maritime structures and aims to attenuate the wave reflection without having to add anti-reflective complementary constructive elements.

[0006] In order to reduce the wave reflection of the vertical maritime structures, a variety of structures has been proposed known as Jarlan-type structures. The Jarlan-type structure, described in the patent US-3118282, consists of a perforated chamber which dissipates, basically, the wave energy by phase delay between the wave reflection on the front permeable wall and the impermeable back wall.

[0007] In all known structures derived from the Jarlan-type, the technical effects to produce the attenuation of wave reflection are the dissipation of energy by turbulence and friction generated in the permeable wall and, more than anything, the reduction of wave reflection by energy dissipation due to the process of superposition of incident and reflected wave trains with different angle phases, propagation direction and orientation if applicable.

[0008] In the document of the patent ES-2262405, a vertical structure for attenuation of wave reflection as referred previously is described. It is a caisson-type structure with at least two rows of cells, in which the first two cells are connected to each other forming a dissipating chamber between a slotted vertical front wall and an impermeable back wall, being the dissipating chamber divided by an intermediate opening.

[0009] In the document of the patent JP-2002275855, a vertical structure of block-type quay is shown in which to apply the concept of the Jarlan-type structure in which the attenuation of wave reflection is transversal and not perpendicular to the frontal vertical face. The block design forms a dissipating chamber not extended in the perpendicular direction to the frontal face of the vertical structure, in which the waves to be attenuated are incident, but extended with a certain inclination with respect to it, and also with an intermediate opening.

[0010] Other known vertical maritime structures adequate to reduce the wave reflection are a row of piles with certain permeability (JP-62170606), slotted multiple walls (US-4154548) or placing multiple walls in front of breakwaters and quays (EP-88440048).

[0011] However, all the existing anti-reflective solutions for vertical maritime structures have the drawback of their exiguous efficacy to reduce the reflection of low frequency waves. Their inadequateness when facing low frequency waves is derived from the fact that the incident wave has a first reflection on the frontal wall or the most advanced part of the structure and the last reflection on the most posterior part reached by the flow; if the round-trip time of the flow between the frontal wall and the back

wall is much less than one half of the incident wave period, there is no significant interference between reflected waves, and the anti-reflective efficacy is low. In other words, if the width of the anti-reflective zone of the breakwater or quay is much less than a quarter of the wavelength, the anti-reflective effectiveness is quite small. That imposes the need to reserve large space for the anti-reflective zone generating high construction costs compared to conventional typologies. Thus, to construct anti-reflective vertical breakwaters or quays which are effective for low frequency waves, with high wave periods associated with intense sea storms and swell waves with wavelengths above 100 meters, it would be necessary to establish an anti-reflective zone width above 10 meters, impracticable in most of the block-type quays and impracticable or very costly in caisson-type quays and breakwaters because it would affect more than two rows of cells. For lower frequencies, with wave periods higher than 30 seconds associated to wind waves, groups of waves, basins resonance and other low frequency waves, the blocks, which are usually a few meters in width, and the caisson-type breakwaters, which are usually up to 20 meters in width, are not capable of constructing anti-reflective zones wide enough to attenuate the reflection of the low frequency waves.

[0012] In short, the technical problem, which is the focus of the present invention, is to provide a vertical port or maritime structure adequate for the attenuation of the wave reflection and efficient for wind waves and low frequency waves.

Description of the Invention

[0013] In order to attenuate the wind waves and low frequency waves in vertical maritime structures such as quays and vertical breakwaters with usual structure widths and constructive methods, the invention includes different dissipation chambers which aim to implement the technical effect of the Jarlan-type structures. As a novelty, the different dissipating chambers are extended horizontally forming circuits of several units, cells or blocks, along different directions, allowing for an extension of the pathway of the circulation of the flow induced by the waves, and thus increasing the anti-reflective effectiveness for the lowest frequency waves.

[0014] For a better understanding of the present invention, the following concepts which define the vertical maritime structure, object of the invention, are presented. "Unit" is defined as the hollowed block in the case of block-type quay and the cell in the case of caisson-type breakwaters and quays; "dissipation chamber" is the set of interconnected units forming a circuit isolated from other "dissipation chambers"; "circuit" is the space or pathway travelled by the flux of waves through a dissipation chamber from the incident point to the partial dissipation and/or exit from the attenuation system as a function of the established chamber characteristics; "frontal" is the front face of the vertical structure on which the waves are

incident; "lateral" is any of the vertical or almost vertical surfaces in the dissipating chamber parallel to the direction of the wave flow; "back wall" is the surface located at the end of the dissipating chamber; "superior" and "inferior" are the horizontal or almost horizontal surfaces located above and below, respectively, the dissipating chamber referred to the circulation direction; "anti-reflective zone" is the volume with hollows of the maritime vertical structure located near the frontal face of the structure designed to attenuate wave reflection in which the dissipating chambers are located; and "anti-reflective zone width" is the maximum distance between the frontal face of the structure and the more distant point of the anti-reflective zone in a direction perpendicular to the frontal face of the structure.

[0015] The maritime structure of the invention has one or more dissipating chambers opened in the frontal face of the structure. Each dissipating chamber is formed by a set of interconnected units through intermediate openings, extending horizontally in at least two different directions of circulation. The typical dissipating chamber width, measured perpendicularly to the wave flow, is at least one unit, which is the cell width or the block width as placed in the structure. On the other hand, the length of the dissipating chamber is determined by the route length of the wave flow within the dissipating chamber between the frontal wall and the back wall, or half the length of the circuit of units if the chamber has to frontal openings and does not have back wall.

[0016] Therefore, the present invention aims to be a vertical maritime structure for attenuation of wave reflection according to claim 1 which includes:

- an anti-reflective zone, having one or more dissipating chambers, isolated from each other, opened through one or several openings on the frontal face of the structure;
- one or several dissipating chambers, formed by a set of interconnected units through intermediate openings between contiguous units;
- impermeable lateral and posterior walls of each dissipating chamber which may contain additional elements to increase the energy losses by friction within the chamber;
- the dissipating chamber width, being at least one unit and
- the dissipating chamber, horizontally extended longitudinally with at least two different directions of circulation.

[0017] The units may be squared, rectangular or circular cells, or squared or rectangular blocks.

[0018] As particular implementation of the invention, the maritime structure is a caisson-type quay or caisson-type breakwater with cells in which each dissipating chamber is formed by a set of cells interconnected through the intermediate openings between contiguous cells, being impermeable the lateral and posterior walls

of the dissipating chamber.

[0019] The maritime structure is a block quay in which each dissipating chamber is formed by a set of hollowed blocks, interconnected through intermediate openings between contiguous blocks, being impermeable the lateral and posterior walls of the dissipating chamber.

[0020] The length of the dissipating chamber is longer than the width of the anti-reflective zone of the structure. As particular implementation, such length is equal to or higher than two units of cell or block.

[0021] In the maritime structure of the invention, both the frontal opening and the intermediate openings of the dissipating chamber can be a window, slots or holes. As preferred embodiment, such openings have a permeability that is kept constant or decreases along the dissipating chamber, from the frontal opening to the back wall, or to half the length of the dissipating chamber if the dissipating chamber has two frontal openings and no posterior wall.

[0022] The cells of the maritime caisson structure may have different configurations described by plan cross-sections such as squared, rectangular, circular or polygonal, being today the most frequently used the squared or circular.

[0023] In the case of a structure formed with squared units - cells or blocks -, the directions of circulation are defined in the present document as the different directions parallel to the lateral walls of each dissipation chamber, being each direction defined by at least two units, cells or blocks. In the case of a structure formed with circular units, the directions of circulation are defined in the present document as the directions parallel to the vertical plane externally tangent to the circular units which constitutes the lateral wall of the dissipating chamber, being each direction defined by at least two units. Analogously the concept of direction of circulation would be defined as in the case of which the unit were not circular or squared, with object referred to a principal direction of circulation of the flux of the waves.

[0024] The invention provides dissipating chambers forming circuits of units with lengths greater than the width of the anti-reflective zone of the breakwater or quay. The optimum number and the length of the dissipating chambers with the anti-reflective circuits of multiple units in breakwaters or quays will depend on the local wave climate and incident wind waves, on the one hand, and the characteristics of ships and boats, on the other hand. When the incident waves, whose reflection is to be attenuated, do not have low frequency, it may be convenient simply to use the conventional Jarian-type chambers with a width of the anti-reflective zone greater than 10% of the wavelength. If very low frequency waves are to be attenuated, as the resonance waves in harbor basins, then it will be specially appropriate to use the anti-reflective circuits of multiple units of considerable length; in this case, although the frontal structure wall would be impermeable in a large proportion for a fixed anti-reflective zone, the few permeable zones would be very effi-

cient in reducing the reflection of the very low frequency waves.

[0025] The present invention provides an effective response to the problem of reduction in the wave reflection on quays and vertical breakwaters facing wind waves and waves with high periods, without enlarging the width of the anti-reflective zone of the structure. Additionally, the invention constitutes a practical solution from the constructive point of view, as well as being economically viable. Furthermore, the dissipating chambers with anti-reflective circuits of multiple units object of the invention are applicable not only to vertical structures of blocks or caissons, but also to contours of basins, crown-walls, channels of navigation and, in general, structures with an almost vertical or vertical face in which the aim is to reduce the wave reflection of wind waves and low frequency water oscillations such as wind waves and oscillations associated with intense storms, resonance waves in harbor basins, etc.

[0026] More specifically, the dissipating chambers with circuits of multiple units in the present invention, can be defined for two types of vertical structures: (a) caisson-type vertical structures for quays and breakwaters in more than 10 meters water depth and (b) block-type vertical structures for quays constructed in less than 18 meters water depth. In the case of caisson structures, the upper part of the frontal row or rows of cells of such caissons are modified until a certain water depth to form floodable cells connected between them creating circuits, separated from other circuits. These circuits have one extreme opened to the exterior in the frontal structure face and another extreme closed and impermeable having an approximate length from 10% to 20% of the mean wavelength whose reflection is to be reduced, or two extremes open to the exterior in the frontal structure face, with an approximate length from 20% to 40% of the mean wavelength whose reflection is to be reduced. In the case of block-type quays, it may be constructed on site or using modular anti-reflective elements prefabricated on ground to replace the upper row or rows of blocks creating with them the dissipating chamber with circuits of blocks of greater length than the unit of block in the quay. In the case of using hollowed blocks, the elements only have two vertical permeable faces through which the water can flow to the following block of the circuit, except for the element located at the end of each circuit which will only contain a permeable face to allow entry to a unit without connections with other units in the horizontal plane.

[0027] Thus, although the quay or breakwater has an anti-reflective zone of a few meters in width - typically 4 meters in block-type quays and 7 meters in caisson-type quays and breakwaters-, the dissipating chambers with circuits of multiple units permit an effective reduction in high-period wave reflection and not only ship waves and low period wind waves. On the other hand, the possibility of having circuits of multiple units with longer or shorter length with the same anti-reflective zone width in break-

waters and quays, makes it suitable to the wave local conditions and the long waves incident on the structure, which makes it possible, therefore, to obtain optimum specific designs adapted to the local conditions in each stretch of the construction. For instance, the caissons used in the breakwater of a commercial port may have long circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the most frequent and most intense wave storm in the year which usually is responsible for the port being closed; the caissons used in quays more exposed to the wind waves which penetrate through the harbor entrance may have shorter circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the wave storms which cause the maximum inner harbor agitation every year, and the caissons located in the most sheltered areas of the port may have much longer circuits of multiple units, adequate to reduce the wave reflection of the long waves associated with the wave groups of the storms, the harbor basin resonance and other low frequency waves. That is to say, instead of being forced to use in practice the same solution in all situations, the dissipating chambers with circuits of multiple units permit the caissons or blocks to be adapted in order to achieve the adequate wave reflection reduction in each stretch of the breakwater or quay of a harbor without enlarging the width of the anti-reflective zone.

[0028] A difference between the conventional anti-reflective systems with dissipating chambers of one and two units, in which the optimum permeability of the intermediate and frontal walls is about 30%, which has a relevant influence on the reduction of wave reflection, in the circuits of multiple units the optimum permeability is higher and, in the case of the caissons with circular and squared or rectangular cells, the maximum permeability will usually be limited by constructive constraints. Two rules must be followed to establish the permeability within each circuit: (a) the permeability of the entrance to each unit must be maintained or decreased from the exterior wall to the interior and (b) the mean permeability should be higher if the length of the dissipating chamber is higher and the water depth within the chamber is lower. Approximately, one can use the mean porosity equal to $20\% + 10\%[N^{1/2} + (h/hc)^{1/4}]$, in which N is the length of the dissipating chamber measured as the number of units of the circuit, and h/hc is the ratio between the water depth in the basin where the vertical maritime structure is located and the water depth of the dissipating chamber. Thus, for instance, if the water depth of the dissipating chamber is one-fifth the water depth in the harbor basin, h/hc=5, and if the dissipating chamber has a circuit formed by one unit opened to the frontal wall, four intermediate units and one posterior unit, the final circuit has a length of N=6 units, then the optimum permeability is approximately p1 and p2= 70% for the entrance to the frontal unit and the adjacent unit, p3 and p4=60% for the entrance to the third and fourth units of the circuit, and p5 and p6=50% for the entrance to the fifth unit and the entrance to the posterior unit. If the dissipating chamber

does not have a closed posterior unit and it is formed with two units opened to the frontal wall and four intermediate units, the effective length is one half, N=6/2, because the flux penetrates from the frontal face of the structure to the interior and the approximate permeability to be used is 55% for the entrance to the two units opened to the frontal face of the structure, 50% for the entrance to the contiguous units to the frontal units, and 45% for the remaining connections between internal units of the dissipating chamber.

[0029] In order to increase the stability and the energy dissipation processes within the dissipating chambers, the units can be partially filled with resistant elements such as stones, prefabricated pieces or other specific elements which increase the loss of energy by friction and the weight of the structure.

[0030] Therefore, the cells which are partially opened and connected in the caisson-type structures for breakwaters and quays, may form dissipating chambers with circuits of multiple units of a length greater than the width of the anti-reflective zone to effectively reduce the reflectivity of wind waves and low frequency waves and adapting better to the local agitation conditions in each stretch of breakwater or quay. It can be said that the anti-reflective effectiveness of the circuits of multiple units depends essentially on three factors: (a) the width of the anti-reflective zone, (b) the water depth within the dissipating chambers and (c) the length of the circuits; the first two factors are usually conditioned by constructive constraints and the third factor is the one which must be determined in each case to reduce as efficiently as possible the wind waves and the incident waves in each stretch of the construction.

[0031] The formation of dissipating chambers with circuits of multiple units in caissons for breakwaters and quays implicitly involves the horizontal separation of one circuit from the others, because the cells of the caissons are separated and are only opened or connected to the cells corresponding to each circuit of the desired length to cause a horizontal entry and exit flow. In the case of circuits of multiple units formed in block-type quays, care must be taken to not have connection between blocks in different circuits; the circuit block units are defined in the horizontal plane and may have vertical connections between pairs of blocks or elements located one above the other. However, there should be no flow through the horizontal connections of blocks from different circuits. As a general rule, the units of the same dissipating chamber must not be connected unless those units have been defined as contiguous units within the same circuit of units, because that would reduce the effective length of the circuit.

Description of the Drawings

[0032] To complement the description herein and to enhance the understanding of the features of the invention, according to a preferred practical embodiment thereof,

set of drawings is attached as an integral part of said description, in which the following is shown with an illustrative and non-limiting character:

Figure 1.- This representation of a vertical maritime structure of cells which the invention addresses, corresponding specifically to a caisson-type quay, provides a perspective (1 A) and a vertical cross-section (1 B).

Figure 2.- This representation of a vertical maritime structure of blocks which the invention addresses, corresponding specifically to a block-type quay, provides a perspective (2A) and a vertical cross-section (2C). Two different typologies of block elements are also shown to form the dissipating chambers of multiple units (2B). Figure 2B shows two typical blocks, one preferred for the frontal row (the slotted one) and the other preferred for the posterior row.

Figure 3.- This representation shows a caisson-type vertical breakwater of squared cells after the invention, a perspective (3A) and an schematic plan (3B), with an anti-reflective zone of two cells' width in which circuits of multiple cells have been formed with different lengths: 6 units (B-B'), 5 units (D-D'), 4 units (A-A') and 3 units (C-C'), which permit a reduction in wave reflection over a wide range of wave periods.

Figure 4.- This representation shows a caisson-type quay of circular cells after the invention, a perspective (4A) and an schematic plan (4B), with an anti-reflective zone of two cells' width in which circuits of multiple cells have been formed with different lengths: 4 units (A-A', C-C' and D-D') and 3 units (B-B').

Figure 5.- This representation shows a caisson-type quay of squared cells after the invention, a perspective (5A) and an schematic plan (5B), with an anti-reflective zone of two cells' width in which circuits of multiple units have been formed with the same length: 4 units (A-A', B-B', C-C' and D-D'). The cells forming the circuit B-B' have additional elements which increase the roughness of the dissipating chamber bed and, as referred in the description of the invention, increase the wave energy losses by friction.

Figure 6.- This representation shows a caisson-type quay of squared cells after the invention, a perspective (6A) and an schematic plan (6B). Figure 6B, shows the quay with an anti-reflective zone of two units' width in which three circuits of multiple units of 5 units' length (A-A', C-C' and E-E'), and three isolated units (B-B', D-D' and F-F').

Description of the Preferred Embodiment of the Invention

[0033] The Figures 1, 2 and 3 show vertical maritime structures to which the invention addresses: caisson-type quay (Figure 1), block-type quay (Figure 2) and caisson-type vertical breakwater (Figure 3).

[0034] In Figures 3, 4, 5 and 6, it can be observed how the dissipating chamber with the circuits of multiple units (6) can be formed from a caisson-type structure with cells (1) squared (Figures 3, 5 and 6) or circular (Figure 4) making frontal openings (4) in the frontal face of the structure (3) and intermediate openings (5), including windows (10), slots (11) or holes (12) in the zone near the mean sea level, forming in this way dissipating chambers (6) with an adequate number of units for the period of the waves for which reflection is to be reduced.

[0035] Analogously, the dissipating chambers with circuits of multiple cells (6) would be formed in vertical maritime block-type structures (2), placing the block-type hollowed elements with frontal openings (4) and intermediate openings (5) including windows (10), slots (11) or holes (12) as shown in Figure 2A, through which the blocks of dissipating chamber (6) are interconnected with the desired length circuit.

[0036] The dissipating chambers with circuits of multiple cells can be formed with different lengths, as shown in Figure 3, to be effective in the attenuation of the wave reflection in a wide range of low frequencies and to only somewhat less effective in the attenuation of the reflected waves of high frequency. The intermediate openings (5) of the cells (1) or blocks (2) can be window-type (10) (Figures 3 and 4), slots (11) (Figures 5A and 5B) and holes (12) (Figures 6A and 6B).

[0037] The circuits of multiple units or dissipating chambers (6) can also be formed of similar length, as shown in Figure 5 to be more effective in the attenuation of the wave reflection in a limited range of low frequencies and to be less effective in the attenuation of the wave reflection of high frequency waves.

[0038] The dissipating chambers with circuits of multiple units (6) can be formed with equal lengths and repetitive circuits as shown in Figure 5B, which will always attenuate in a more effective way the wave reflection of higher periods and in a less effective way the waves of lower periods.

[0039] The dissipating chambers with long circuits of many units can be built next to isolated anti-reflective units as shown in Figure 6B to be simultaneously effective in the attenuation of wave reflection of very low frequency waves, as well as ship waves. The intermediate openings (5) between contiguous cells (1) or blocks (2) in the same dissipation chamber must be permeable. As a general rule, less permeable will be the frontal opening of the isolated cells or blocks and the opening between the inner cells or blocks in circuits with multiple units, being of higher permeability the openings between units of longer circuits and units near the frontal face of the structure.

[0040] Finally, the circuits of multiple units can be very

long so as to have the maximum effectiveness in the attenuation of the wave reflection of the lowest frequency, as the resonance waves in harbor basins, although they show low effectiveness to attenuate the wave reflection of the ship waves having high frequency.

[0041] The cells or blocks of the dissipating chamber can be partially filled with elements to increase the roughness of the dissipation chamber bed such as stones (14) or other elements, as shown in Figure 5A, to increase the energy losses by friction in the entry and exit flow from the circuit, collaborating in the attenuation of the reflected energy.

Claims

1. Vertical maritime structure for the attenuation of wave reflection, comprising:

a frontal face (3), an anti-reflective zone (9) located near the frontal face (3) to attenuate wave reflection, and incorporating several dissipation chambers (6),

wherein the dissipation chambers are opened on the frontal face (3) through openings (4), (10), (11), (12) made in the frontal face (3) of the structure,

wherein each dissipation chamber (6) is formed by a set of units selected from cells (1) or blocks (2) of the structure, and wherein adjacent units of each dissipation chamber (6) are interconnected through intermediate openings (5), wherein the dissipation chambers have impermeable lateral and back walls (7), wherein each dissipation chamber has a width of at least one cell (1) or block (2); and wherein each dissipation chamber extends horizontally in the structure forming circuits

characterized in that the dissipation chambers (6) are isolated from each other, wherein the circuits are formed by several interconnected cells (1) or blocks (2) with at least two different directions of circulation (8),

and wherein the length of one dissipation chamber is longer than the width of the anti-reflective zone (9) of the structure, wherein said width of the anti-reflective zone (9) extends from the vertical frontal face (3) to the more distant point of the anti-reflective zone (9) in a direction perpendicular to the vertical frontal face (3).

2. Vertical maritime structure for the attenuation of wave reflection, according to claim 1, **characterized in that** the units are selected from square, rectangular or circular cells" and blocks, with a square or rectangular section.
3. Vertical maritime structure, according to any one of

the previous claims, **characterized in that** the frontal openings (4) and the intermediate openings (5) are selected from the group consisting of windows (10), slots (11) and holes (12).

4. Vertical maritime structure, according to claim 3, **characterized in that** the frontal openings (4) and the intermediate openings (5) have a permeability is kept constant or decreases in the direction of the length of the dissipation chamber passing from the frontal opening (4) towards the interior.

5. Vertical maritime structure, according to any one of the previous claims, **characterized in that** the dissipation chamber (6) contains specific elements (14) increasing the roughness of the chamber bed to increase the friction and the energy losses of the incident wind waves.

6. Use of the vertical maritime structure, defined in any one of the previous claims 1 to 5, as a quay.

7. Use of the vertical maritime structure, defined in any one of the previous claims 1 to 5, as a breakwater.

8. Use of the vertical maritime structure, defined in any one of the previous claims 1 to 5, as a crown-wall.

9. Use of the vertical maritime structure defined in any one of the previous claims 1 to 5, as a navigation channel bank.

Patentansprüche

1. Vertikale Meereskonstruktion zum Abschwächen von Wellenreflexion, umfassend:

eine Vorderseite (3), eine nahe der Vorderseite (3) lokalisierte und mehrere Zerstreuungskammern (6) aufnehmende Antireflexionszone (9) zum Abschwächen von Wellenreflexion, wobei die Zerstreuungskammern an der Vorderseite (3) durch in der Vorderseite (3) der Struktur gefertigte Öffnungen (4), (10), (11), (12) geöffnet sind,

wobei jede Zerstreuungskammer (6) durch eine Zusammenstellung von Einheiten, ausgewählt aus Zellen (1) oder Blöcken (2) der Struktur gebildet ist, und wobei benachbarte Einheiten jeder Zerstreuungskammer (6) durch zwischenliegende Öffnungen (5) miteinander verbunden sind, wobei die Zerstreuungskammern undurchlässige seitliche und rückwärtige Wände (7) aufweisen,

wobei jede Zerstreuungskammer eine Breite von mindestens einer Zelle (1) oder eines Blocks (2) aufweist; und wobei jede Zerstreuungskam-

mer sich horizontal unter Bildung von Kreisbahnen in der Struktur erstreckt, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zerstreungskammern (6) voneinander isoliert sind, wobei die Kreisbahnen durch mehrere miteinander verbundene Zellen (1) oder Blöcke (2) mit mindestens zwei verschiedenen Zirkulationsrichtungen (8) gebildet werden, und wobei die Länge von einer Zerstreungskammer länger ist als die Breite der Antireflexionszone (9) der Struktur, wobei die Breite der Antireflexionszone (9) sich von der vertikalen Vorderseite (3) zum entfernteren Punkt der Antireflexionszone (9) in einer zur vertikalen Vorderseite (3) senkrechten Richtung erstreckt.

2. Vertikale Meereskonstruktion zum Abschwächen der Wellenreflexion nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einheiten ausgewählt sind aus quadratischen, rechteckigen oder kreisförmigen Zellen und Blöcken, mit einem quadratischen oder rechteckigen Abschnitt.
3. Vertikale Meereskonstruktion nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die vorderseitigen Öffnungen (4) und die zwischenliegenden Öffnungen (5) ausgewählt sind aus der Gruppe bestehend aus Fenstern (10), Schlitzen (11) und Löchern (12).
4. Vertikale Meereskonstruktion nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die vorderseitigen Öffnungen (4) und die zwischenliegenden Öffnungen (5) eine Durchlässigkeit aufweisen, die konstant gehalten wird oder in Richtung der von der vorderseitigen Öffnung (4) hin zum Inneren passierenden Länge der Zerstreungskammer abnimmt.
5. Vertikale Meereskonstruktion nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zerstreungskammer (6) spezifische Elemente (14) enthält, die die Rauheit des Kammerbetts erhöhen, um die Reibung und Energieverluste der auftretenden Windwellen zu erhöhen.
6. Verwendung der in einem der vorstehenden Ansprüche 1 bis 5 definierten vertikalen Meereskonstruktion als ein Kai.
7. Verwendung der in einem der vorstehenden Ansprüche 1 bis 5 definierten vertikalen Meereskonstruktion als ein Wellenbrecher.
8. Verwendung der in einem der vorstehenden Ansprüche 1 bis 5 definierten vertikalen Meereskonstruktion als eine Wellenbrecherkrone.
9. Verwendung der in einem der vorstehenden Ansprüche

che 1 bis 5 definierten Meereskonstruktion als ein Fahrinnenufer.

5 **Revendications**

1. Structure maritime verticale pour atténuer la réflexion des vagues, comprenant :

10 une face frontale (3), une zone anti-réfléchissante (9) située près de la face frontale pour atténuer la réflexion des vagues et incorporant plusieurs chambres de dissipation (6), dans laquelle les chambres de dissipation sont ouvertes sur la face frontale (3) à travers des ouvertures (4), (10), (11), (12) ménagées dans la face frontale (3) de la structure, dans laquelle chaque chambre de dissipation (6) est formée par un ensemble d'unités choisies parmi des cellules (1) ou des blocs (2) de la structure et dans laquelle des unités adjacentes de chaque chambre de dissipation (6) sont interconnectées par des ouvertures intermédiaires (5), dans laquelle les chambres de dissipation ont des parois latérales et arrière imperméables (7), dans laquelle chaque chambre de dissipation a une largeur d'au moins une cellule (1) ou d'un bloc (2) ; et dans laquelle chaque chambre de dissipation s'étend horizontalement dans la structure en formant des circuits, **caractérisée en ce que** les chambres de dissipation (6) sont isolées l'une de l'autre, dans laquelle les circuits sont formés par plusieurs cellules (1) ou blocs (2) interconnectés avec au moins deux directions de circulation (8) différentes, et dans laquelle la longueur d'une chambre de dissipation est plus grande que la largeur de la zone anti-réfléchissante (9) de la structure, dans laquelle ladite largeur de la zone anti-réfléchissante (9) s'étend de la face frontale verticale (3) au point le plus distant de la zone anti-réfléchissante (9) dans une direction perpendiculaire à la face frontale verticale (3).

2. Structure maritime verticale pour atténuer la réflexion des vagues selon la revendication 1, **caractérisée en ce que** les unités sont choisies parmi des cellules et des blocs carrés, rectangulaires ou circulaires avec une section carrée ou rectangulaire.

3. Structure maritime verticale selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** les ouvertures frontales (4) et les ouvertures intermédiaires (5) sont choisies dans le groupe constitué de fenêtres (10), de fentes (11) et de trous (12).

4. Structure maritime verticale selon la revendication

3, **caractérisée en ce que** les ouvertures frontales (4) et les ouvertures intermédiaires (5) ont une perméabilité qui est maintenue constante ou diminuée dans la direction de la longueur de la chambre de dissipation en passant de l'ouverture frontale (4) vers l'intérieur. 5

5. Structure maritime verticale selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisée en ce que** la chambre de dissipation (6) contient des éléments spécifiques (14) augmentant les aspérités du lit de la chambre pour augmenter le frottement et les pertes d'énergie des ondes de vent incidentes. 10

6. Utilisation de la structure maritime verticale définie dans l'une quelconque des revendications 1 à 5 comme quai. 15

7. Utilisation de la structure maritime verticale définie dans l'une quelconque des revendications 1 à 5 comme brise-lames. 20

8. Utilisation de la structure maritime verticale définie dans l'une quelconque des revendications 1 à 5 comme mur de couronnement. 25

9. Utilisation de la structure maritime verticale définie dans l'une quelconque des revendications 1 à 5 comme berge de canal de navigation. 30

35

40

45

50

55

9

EP 2 504 496 B1

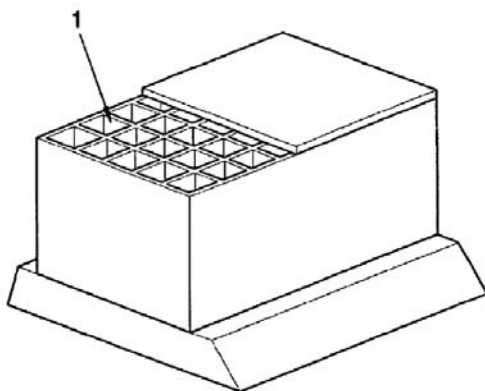


FIG. 1A

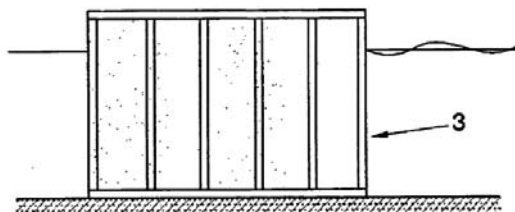


FIG. 1B

EP 2 504 496 B1

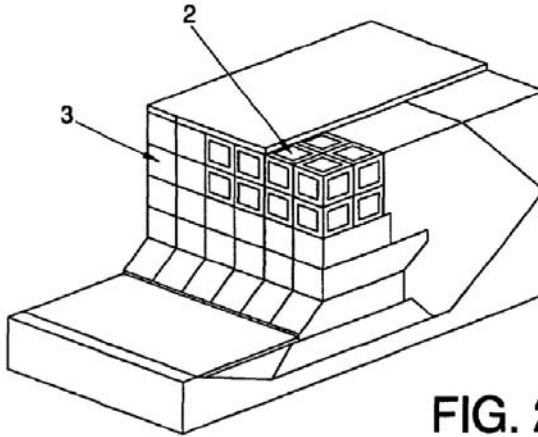


FIG. 2A

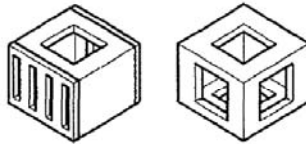


FIG. 2B

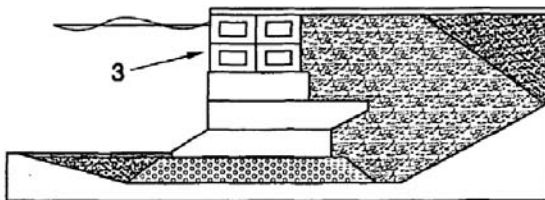


FIG. 2C

EP 2 504 496 B1

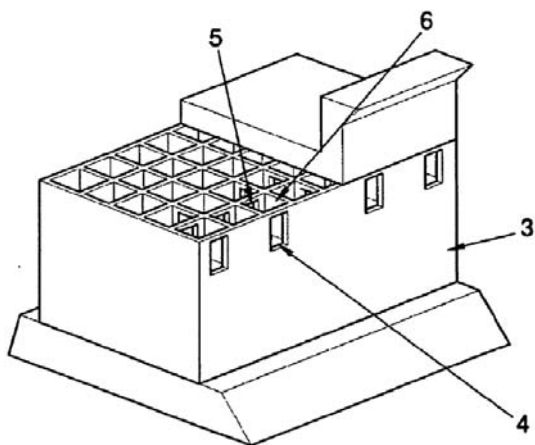


FIG. 3A

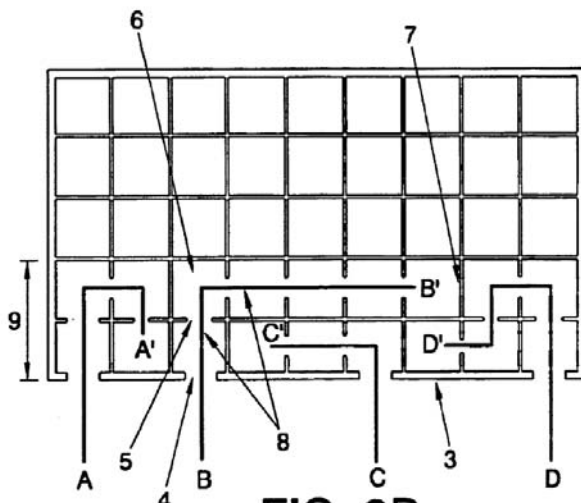


FIG. 3B

EP 2 504 496 B1

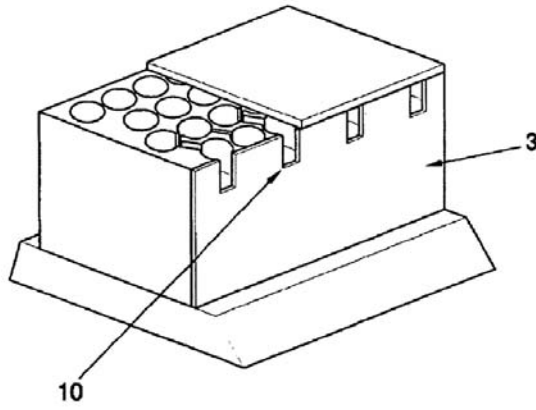


FIG. 4A

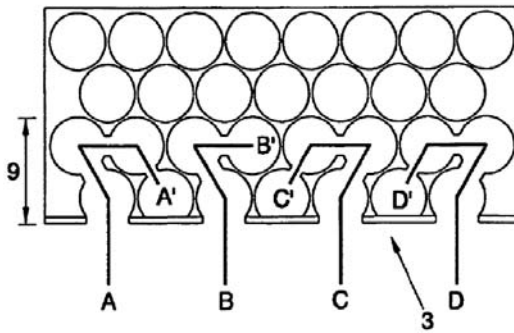


FIG. 4B

EP 2 504 496 B1

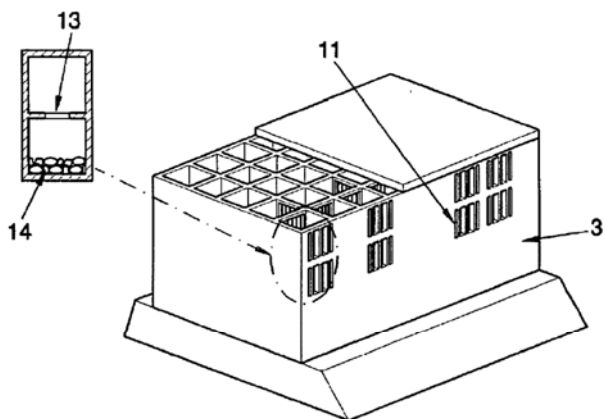


FIG. 5A

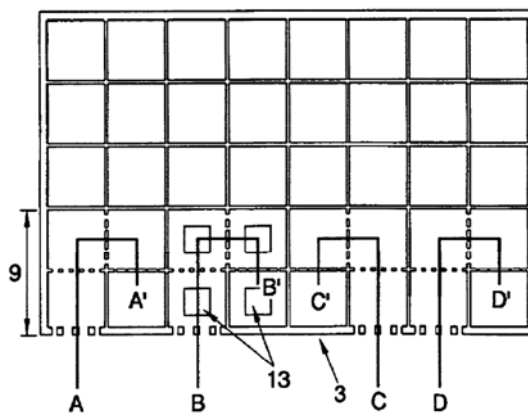


FIG. 5B

EP 2 504 496 B1

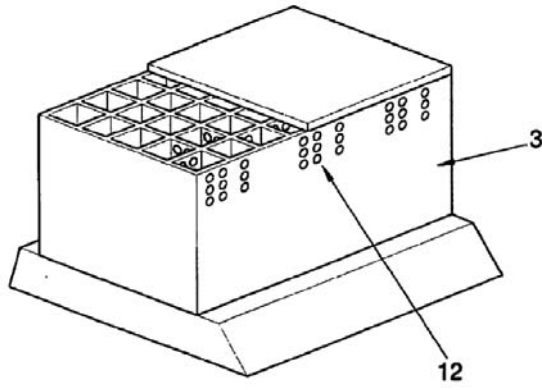


FIG. 6A

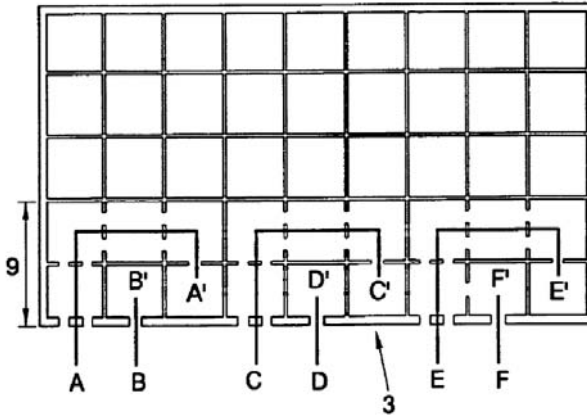


FIG. 6B

EP 2 504 496 B1

REFERENCES CITED IN THE DESCRIPTION

This list of references cited by the applicant is for the reader's convenience only. It does not form part of the European patent document. Even though great care has been taken in compiling the references, errors or omissions cannot be excluded and the EPO disclaims all liability in this regard.

Patent documents cited in the description

- US 3118282 A [0006]
- ES 2262405 [0008]
- JP 2002275855 B [0009]
- JP 62170606 B [0010]
- US 4154548 A [0010]
- EP 88440048 A [0010]

PATENTE N°2

Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R.

2009.

Elemento modular antirreflejante.

ES 2 299 394 (B2). Patente nacional,
fecha anuncio concesión 17.12.2009.



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

<p>⑳ Fecha de presentación: 13.11.2006</p> <p>㉑ Fecha de publicación de la solicitud: 16.05.2008</p> <p>Fecha de la concesión: 02.12.2009</p> <p>Fecha de modificación de las reivindicaciones: 13.10.2009</p> <p>㉒ Fecha de anuncio de la concesión: 17.12.2009</p> <p>㉓ Fecha de publicación del folleto de la patente: 17.12.2009</p>	<p>㉔ Titular/es: Universidad Politécnica de Valencia CTT-Edif. 6G - Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, ES</p> <p>㉕ Inventor/es: Garrido Checa, Joaquín de María; González Escrivá, José Alberto y Medina Folgado, Josep Ramón</p> <p>㉖ Agente: No consta</p>
--	--

㉗ Título: **Elemento modular antirreflejante.**

㉘ Resumen:
 Elemento modular antirreflejante.
 Con muy pocos tipos de elementos modulares (2), se pueden formar bloques antirreflejantes de forma paralelepípedica adecuados para sustituir las filas superiores de bloques macizos de los muelles de bloques convencionales y atenuar al reflexión del oleaje en un amplio rango de frecuencias. Las dimensiones típicas de los elementos modulares (2x2x1.5 metros) permiten formar bloques paralelepípedicos 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.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. Pº de la Castellana, 75 - 28071 Madrid

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.

2

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 permearable ranurado y panel posterior impermeable.

La figura 5.- Muestra una vista en perspectiva de un elemento modular antirreflejante con panel frontal permearable 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 permearable 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 antirreflejante de dos cámaras con panel frontal e intermedio permearable perforado y panel posterior impermeable.

La figura 9.- 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 permearable 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 permearabilidad 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 permearabilidad 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 permearable 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).

5

ES 2 299 394 B2

6

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

4

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

ES 2 299 394 B2

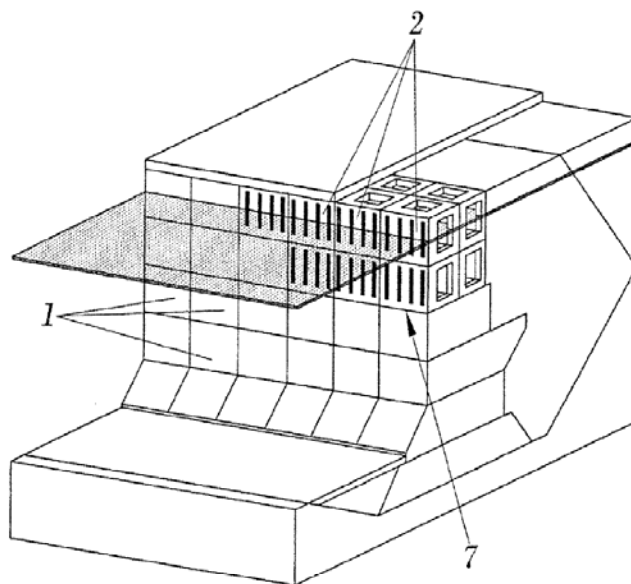


FIG. 1

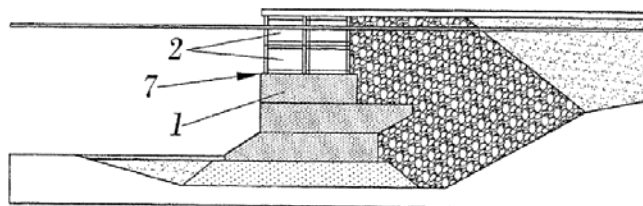


FIG. 2

ES 2 299 394 B2

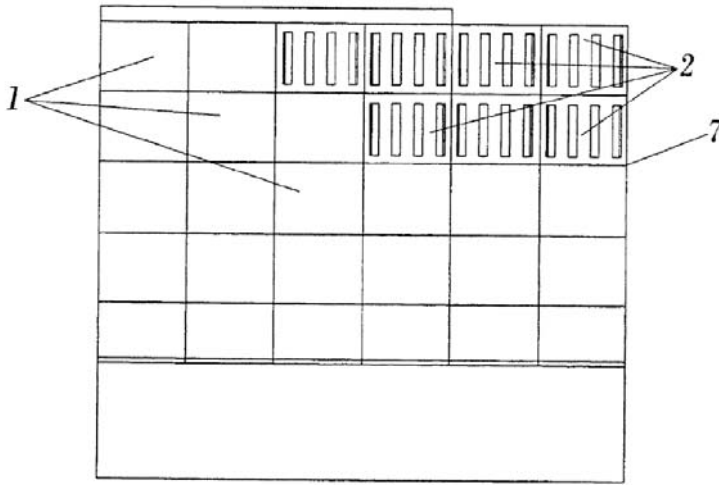


FIG. 3

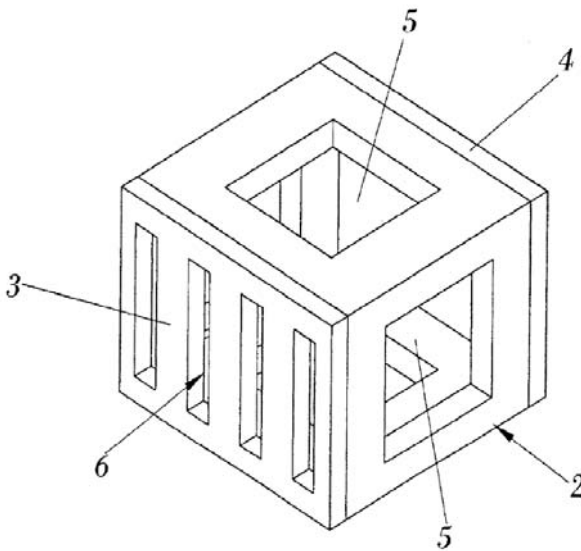


FIG. 4

ES 2 299 394 B2

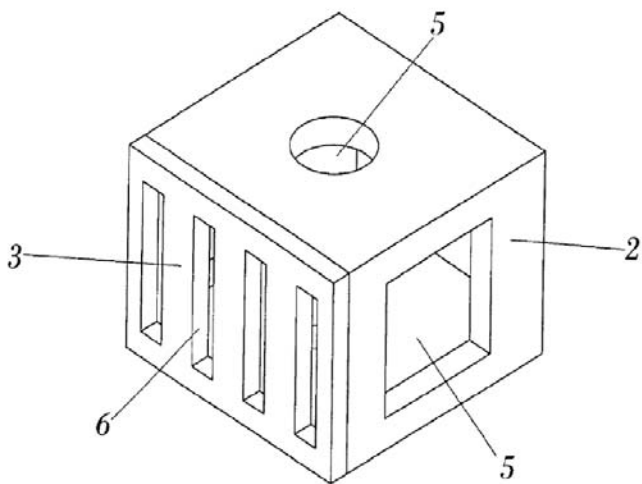


FIG. 5

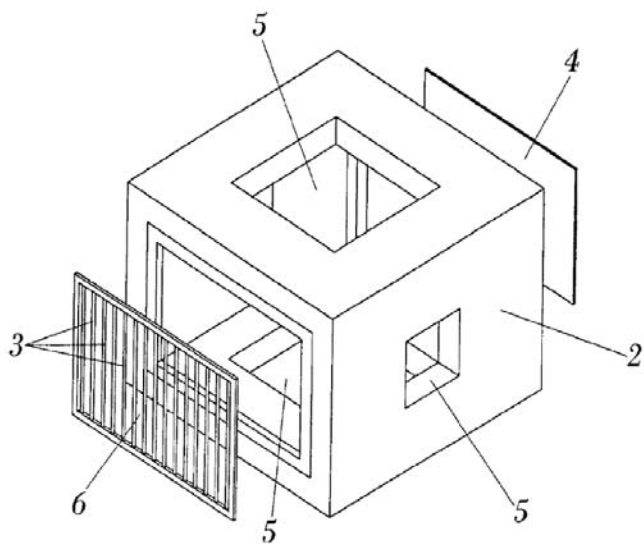


FIG. 6

ES 2 299 394 B2

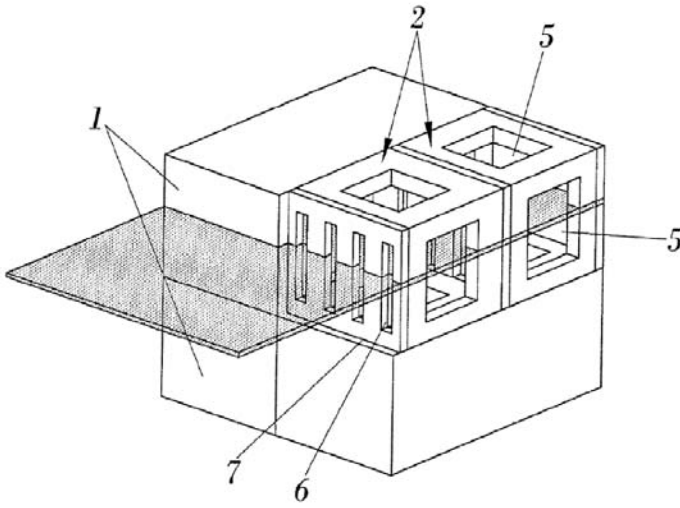


FIG. 7

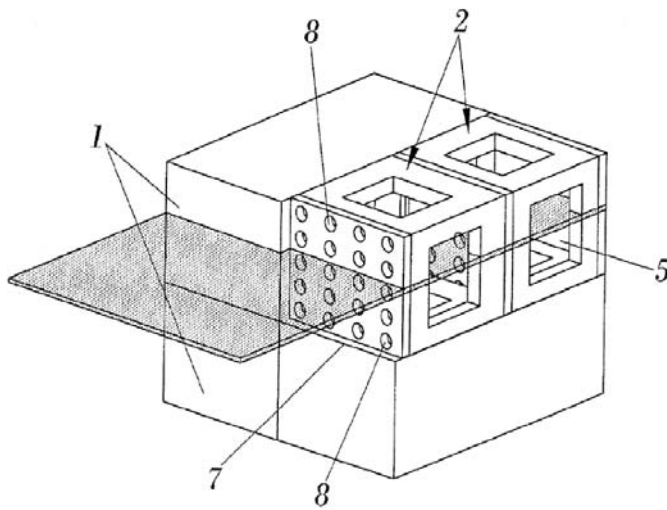


FIG. 8

ES 2 299 394 B2

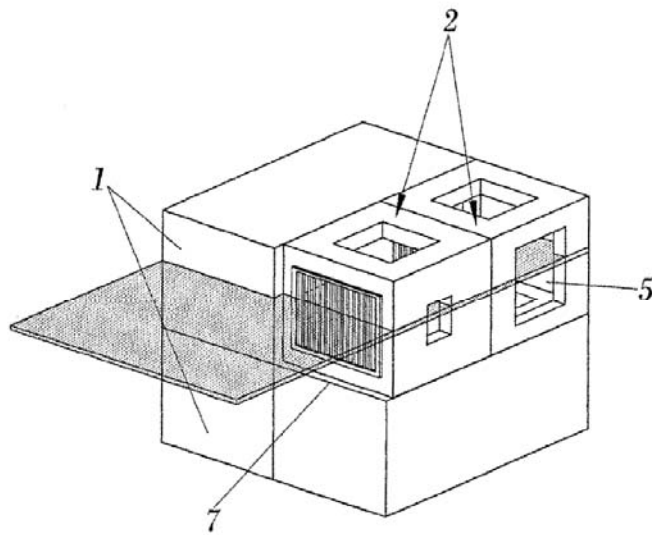


FIG. 9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 299 394

② N° de solicitud: 200602955

③ Fecha de presentación de la solicitud: 13.11.2006

④ 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	⑥	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 otros 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 14.02.2008	Examinador F. Calderón Rodríguez	Página 1/1
---	--	----------------------

PATENTE N°3

Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R.

2009.

Bloque antirreflejante.

ES 2 301 403 (B2). Patente nacional,
fecha anuncio concesión 17.12.2009



11 Número de publicación: **2 301 403**
 21 Número de solicitud: 200603100
 51 Int. Cl.:
E02B 3/06 (2006.01)

12 PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

<p>22 Fecha de presentación: 23.11.2006</p> <p>43 Fecha de publicación de la solicitud: 16.06.2008</p> <p>Fecha de la concesión: 02.12.2009</p> <p>Fecha de modificación de las reivindicaciones: 13.10.2009</p> <p>45 Fecha de anuncio de la concesión: 17.12.2009</p> <p>45 Fecha de publicación del folleto de la patente: 17.12.2009</p>	<p>73 Titular/es: Universidad Politécnica de Valencia CTT-Edif. G6 - Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, ES</p> <p>72 Inventor/es: Garrido Checa, Joaquín de María; González Escriba, José Alberto y Medina Folgado, Josep Ramón</p> <p>74 Agente: No consta</p>
--	---

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.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. P^o de la Castellana, 75 - 28071 Madrid

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 semejan 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, juxtapuestos 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 sobretodo de la permeabilidad de las aberturas (9) y no de la singular dinámica de llenado/vaciado de la cámara prismática.

5

ES 2 301 403 B2

6

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

ES 2 301 403 B2

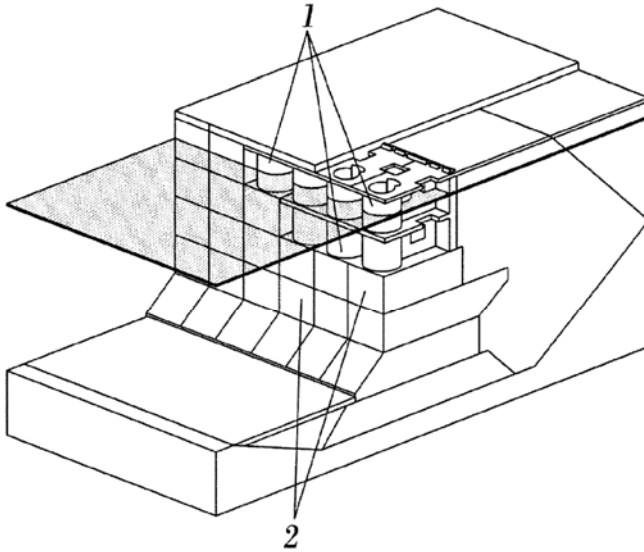


FIG. 1

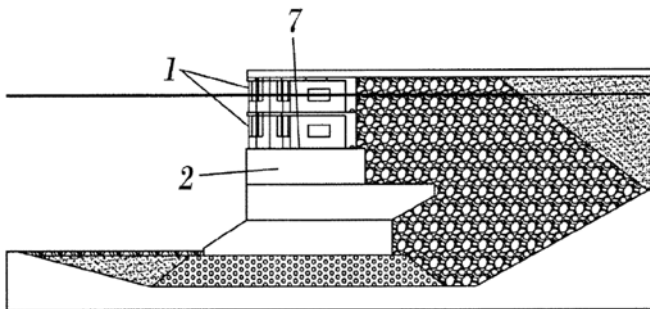


FIG. 2

ES 2 301 403 B2

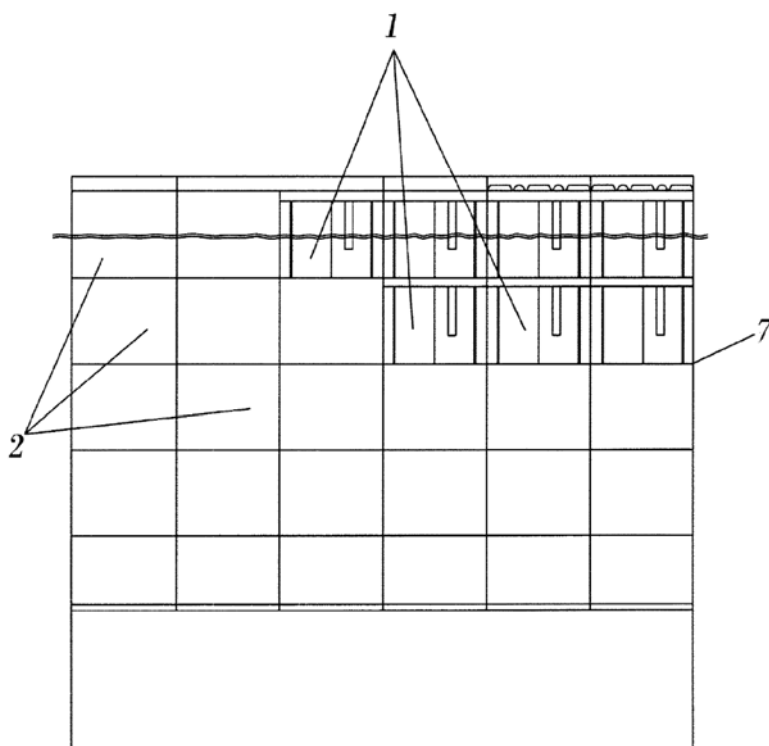


FIG. 3

ES 2 301 403 B2

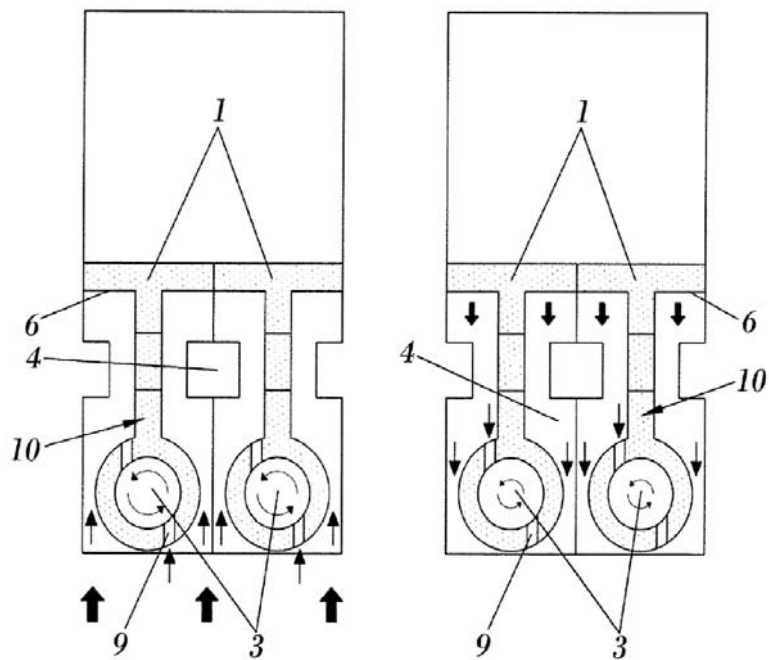


FIG. 5

ES 2 301 403 B2

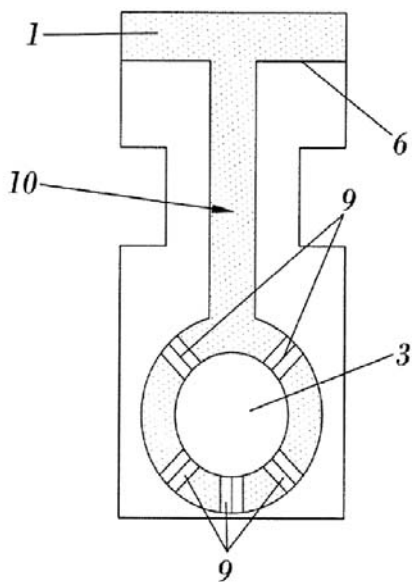
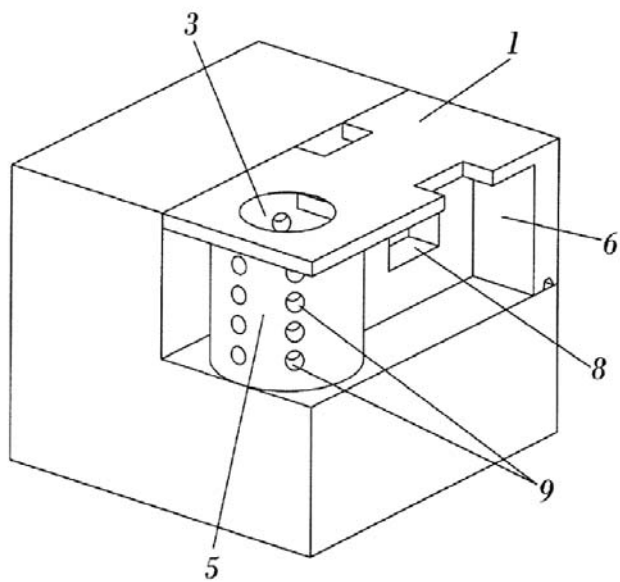


FIG. 6

ES 2 301 403 B2

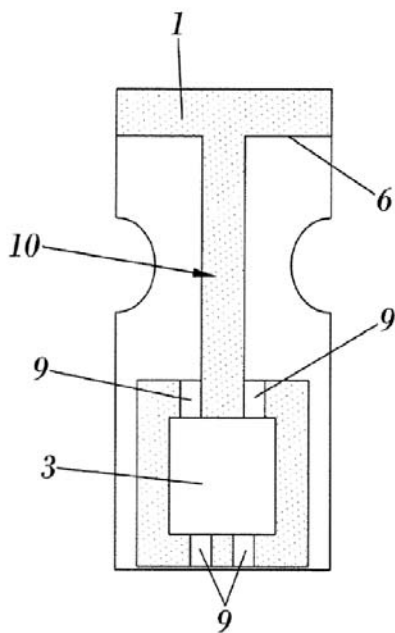
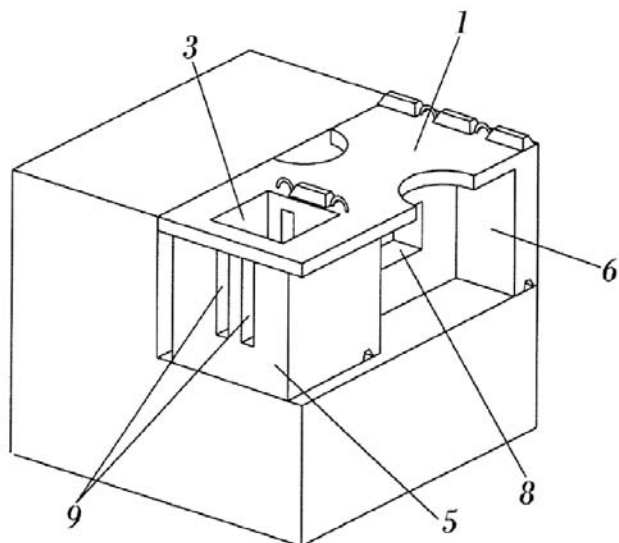


FIG. 7

ES 2 301 403 B2

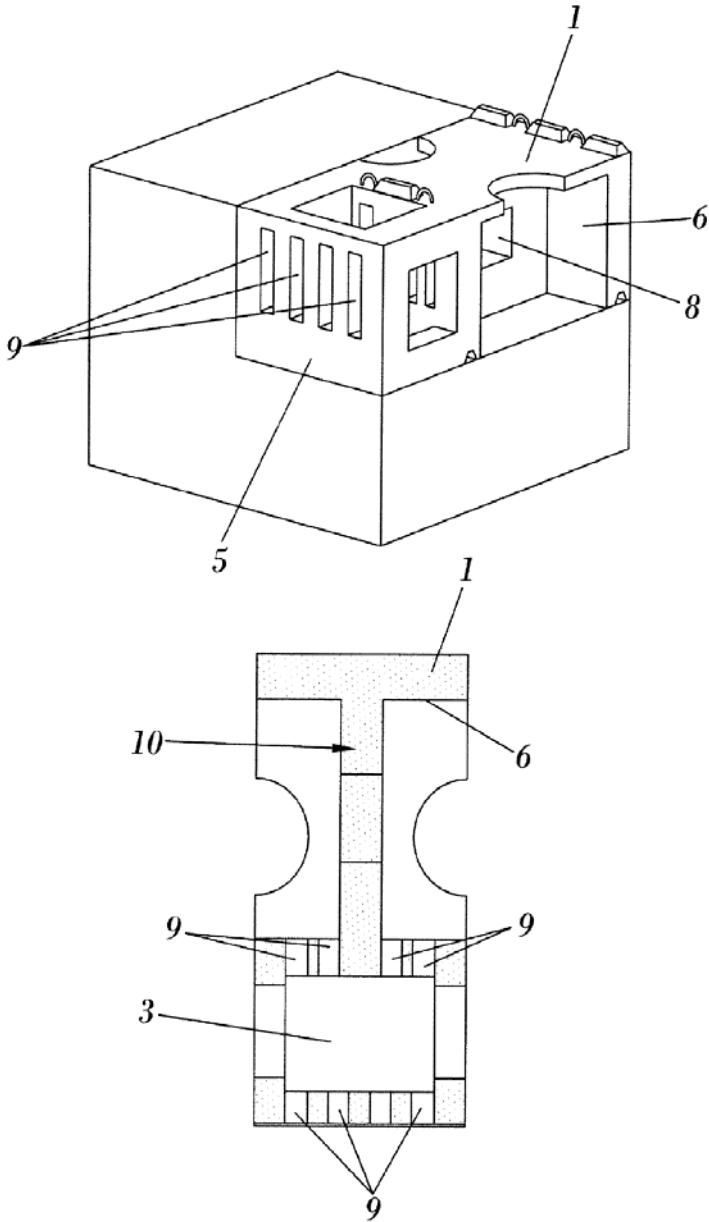


FIG. 8

ES 2 301 403 B2

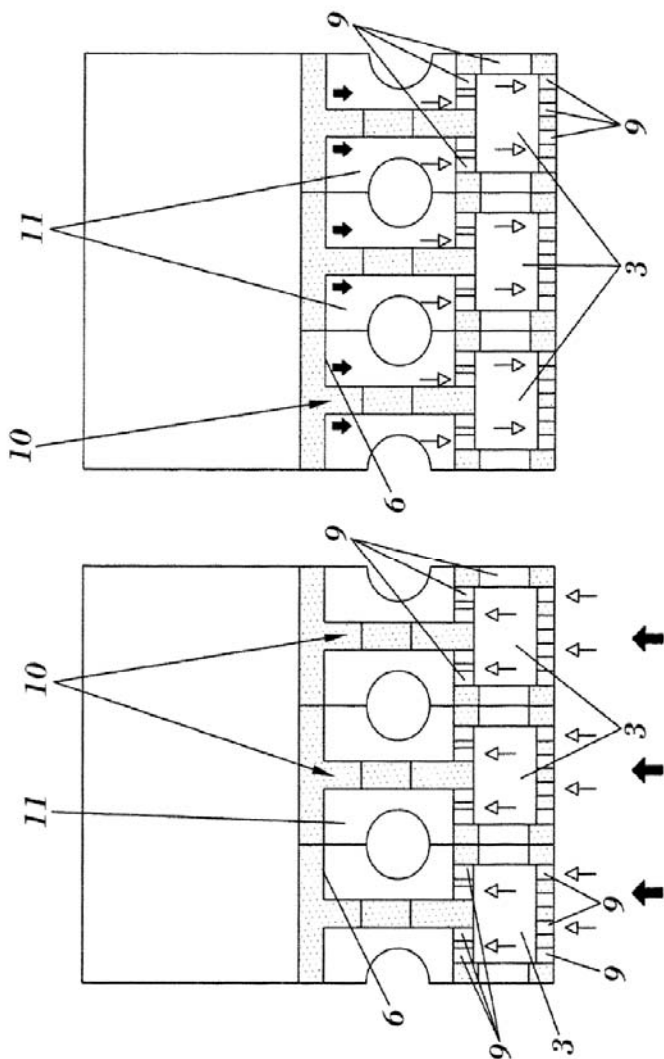


FIG. 9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 301 403

② Nº de solicitud: 200603100

③ Fecha de presentación de la solicitud: 23.11.2006

④ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: E02B 3/06 (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	GB 1523411 A (TOA HARBOR WORKS CO LTD) 31.08.1978, todo el documento.	1,5-8
Y		2,4
X	KR 100650480 B1 (YOOIL ENGINEERING CONSULTANTS) 21.11.2006, figuras.	1,5-7,9
Y		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
<p>Categoría de los documentos citados</p> <p>X: de particular relevancia Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría A: refleja el estado de la técnica</p> <p>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</p>		
<p>El presente informe ha sido realizado</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> para todas las reivindicaciones <input type="checkbox"/> para las reivindicaciones nº:</p>		
<p>Fecha de realización del informe 29.05.2008</p>	<p>Examinador F. Calderón Rodríguez</p>	<p>Página 1/1</p>

PATENTE N°4

Garrido, J.M., González-Escrivá, J.A. y Medina, J.R.

2009.

Dique antirreflejante.

ES 2 301 402 (B2). Patente nacional,
fecha anuncio concesión 27.08.2009.



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS
ESPAÑA



① Número de publicación: **2 301 402**

② Número de solicitud: 200603099

⑤ Int. Cl.:
E02B 3/06 (2006.01)
E02D 23/00 (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN PREVIO

B2

<p>⑫ Fecha de presentación: 23.11.2006</p> <p>⑬ Fecha de publicación de la solicitud: 16.06.2008</p> <p>Fecha de la concesión: 06.08.2009</p> <p>Fecha de modificación de las reivindicaciones: 16.06.2009</p> <p>⑭ Fecha de anuncio de la concesión: 27.08.2009</p> <p>⑮ Fecha de publicación del folleto de la patente: 27.08.2009</p>	<p>⑰ Titular/es: Universidad Politécnica de Valencia CTT-Edificio 6G - Camino de Vera, s/n 46022 Valencia, ES</p> <p>⑱ Inventor/es: Garrido Checa, Joaquín de María; González Escriba, José Alberto y Medina Folgado, Josep Ramón</p> <p>⑳ Agente: No consta</p>
--	---

⑳ Título: **Dique antirreflejante.**

㉑ 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.

Venta de fascículos: Oficina Española de Patentes y Marcas. Pº de la Castellana, 75 - 28071 Madrid

ES 2 301 402 B2

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

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 ramuradas 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-

ES 2 301 402 B2

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 un 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.

Descripción de los dibujos

55 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 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.

ES 2 301 402 B2

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- La figura 13.- Muestra una sección transversal de una cámara prismática de sección circular de cuatro ranuras axiales.
- 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.
- 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.
- La figura 18.- Muestra una vista en alzado de una cámara prismática con hileras de orificios.

Realización preferente de la invención

- 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).
- 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).
- 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.
- 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.

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.

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.

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).

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).

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.

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).

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).

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.

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.

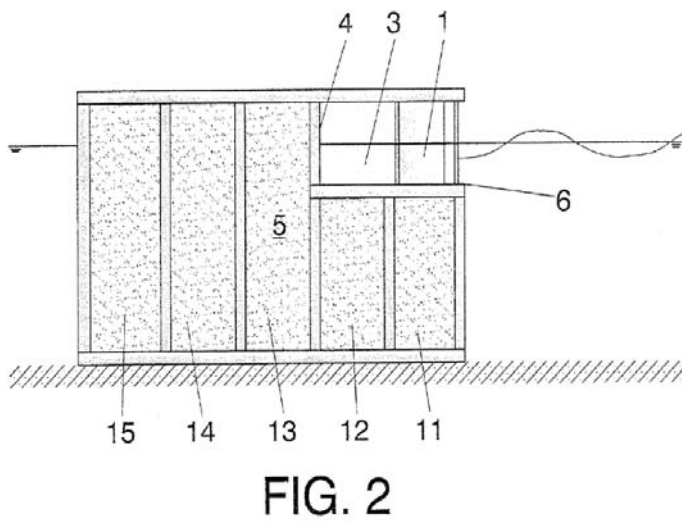
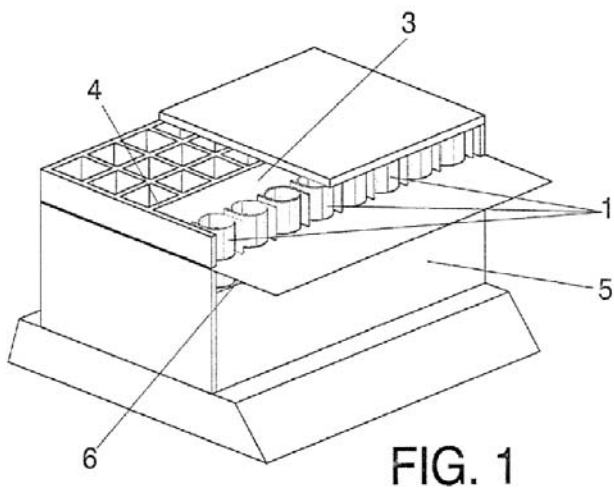
Por último, los espesores y armado de las cámaras prismáticas (1) y de los separadores (7), en su caso, serán los adecuados para resistir las acciones inducidas por el oleaje.

ES 2 301 402 B2

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).

ES 2 301 402 B2



ES 2 301 402 B2

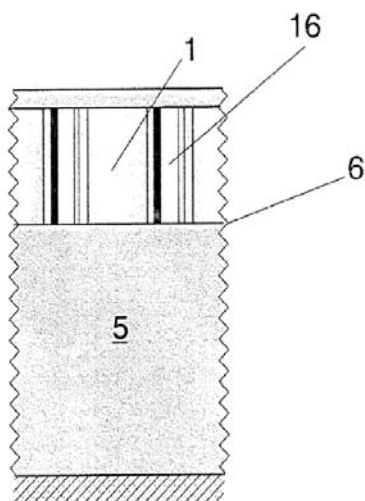


FIG. 3

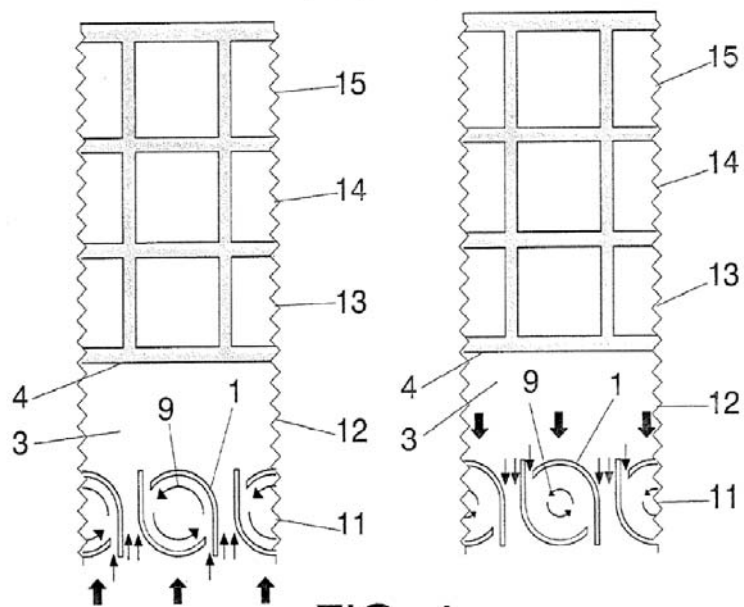


FIG. 4

ES 2 301 402 B2

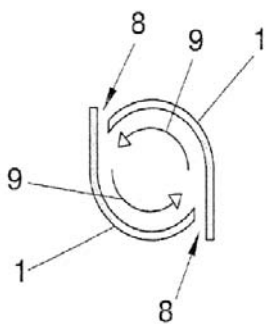


FIG. 5

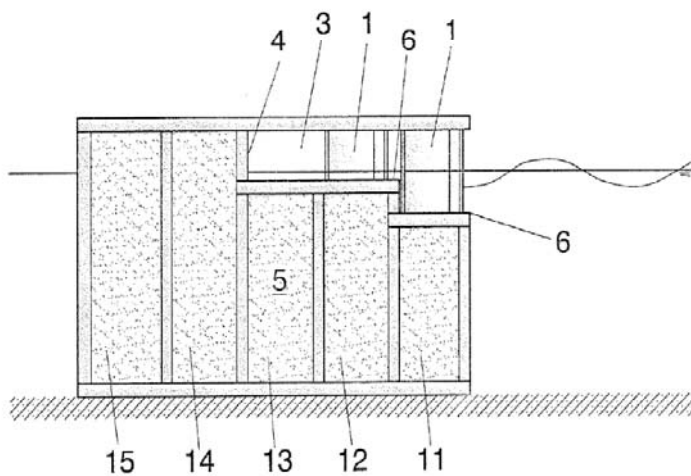


FIG. 6

ES 2 301 402 B2

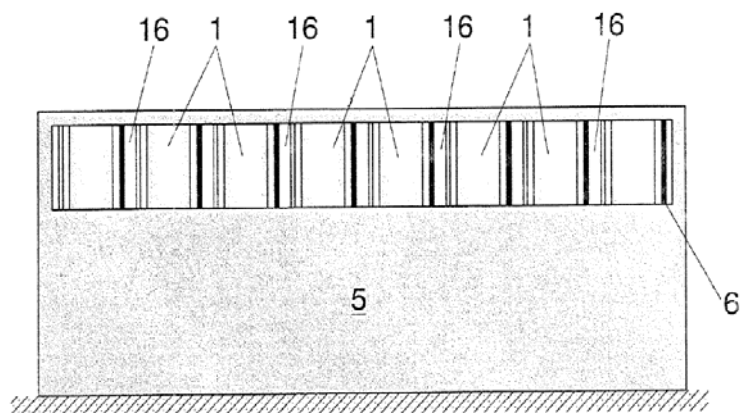


FIG. 7

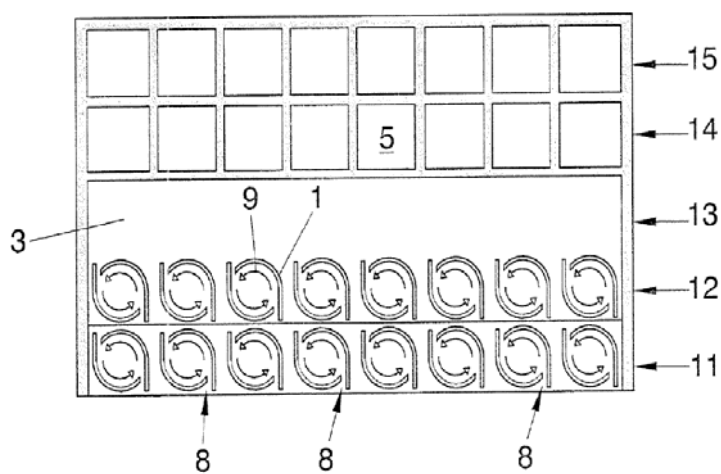


FIG. 8

ES 2 301 402 B2

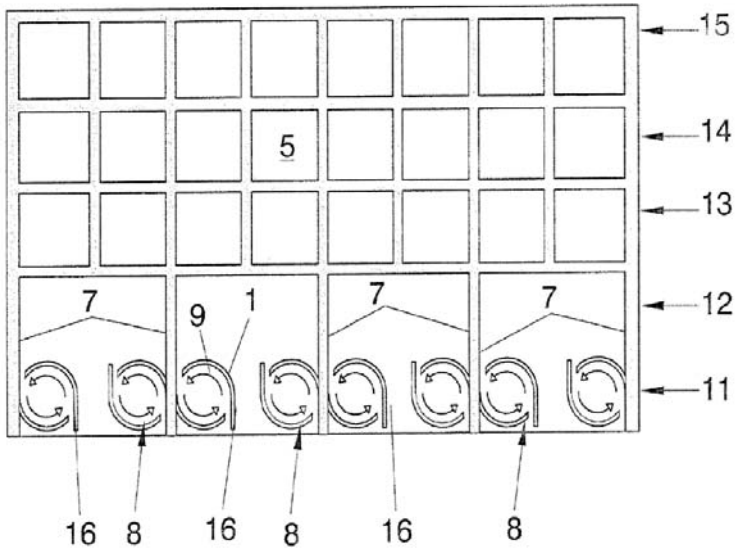


FIG. 9

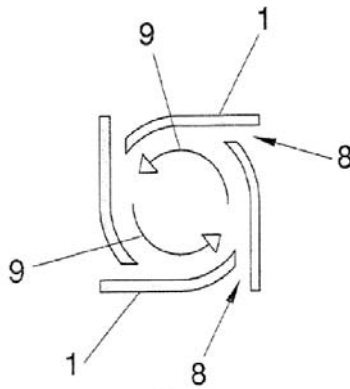


FIG. 10

ES 2 301 402 B2

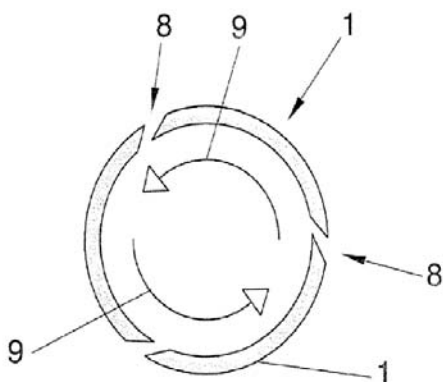


FIG. 11

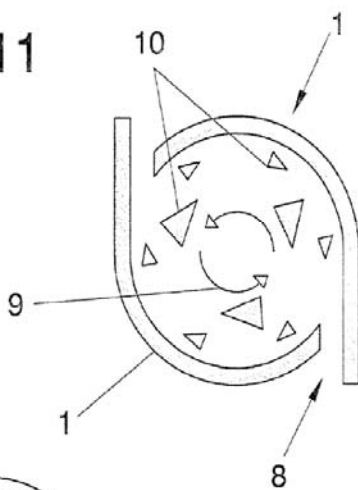


FIG. 12

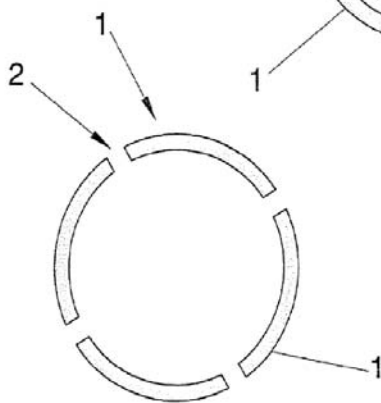
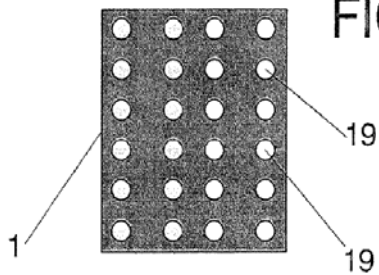
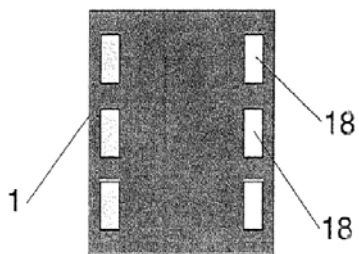
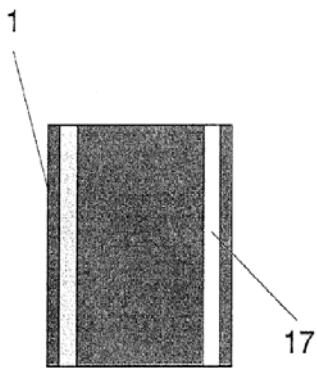
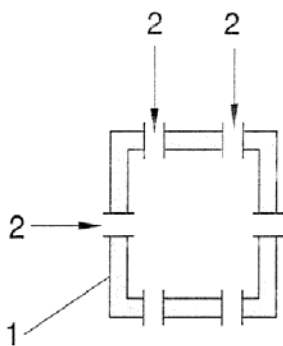
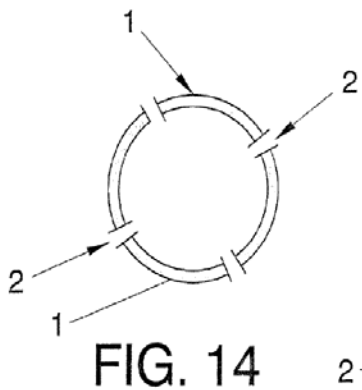


FIG. 13

ES 2 301 402 B2





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
 ②3 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	⑤2 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
---	--	----------------------