



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, mayo de 2017

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
Referencias	233
Anejo 1 Resultados de la experimentación física a escala reducida	253
Anejo 2 Publicaciones relacionadas con la tesis	291
Anejo 3 Patentes relacionadas con la tesis	305

ÍNDICE

I Introducción	29
I.1. Motivación de la investigación.	31
I.2. Objetivos.	34
I.3. Estructura de la tesis.	35
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. <i>Incorporación de rugosidad artificial que incremente la disipación por fricción</i>	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.	225
VI.1.1. Nuevo concepto: circuitos, estructuras ARJ-R de circuitos disipativos largos para atenuar oscilaciones resonantes en puertos.	226
VI.1.2. Nueva metodología experimental: MESRR.	227
VI.1.3. Nueva metodología de análisis basada en el modelo exponencial de amortiguación de las oscilaciones.	228
VI.1.4. Nueva metodología de diseño óptimo para las estructuras ARJ-R. .	230
VI.1.5. Diferencias entre circuitos rectangulares y de celdas circulares. ..	230
VI.2. Líneas de investigación futuras.....	231
Referencias.....	233
Anejo 1 Resultados de la experimentación física a escala reducida.....	253
1. Denominación de los ensayos de SRR.	255
2. Resultados del análisis espectral.	256
3. Representación gráfica de las series temporales de elevación de la superficie libre.	265
3.1. Estructura impermeable (REF).....	265
3.2. Estructuras ARJ-R con dos circuitos disipativos.....	269
3.3. Estructuras ARJ-R con cuatro circuitos disipativos	273

3.4. Estructuras ARJ-R con seis circuitos disipativos	282
4. Gráficas de ajuste exponencial de la energía en la fase de amortiguación de las SRR.	286
Anejo 2 Publicaciones relacionadas con la tesis	291
Anejo 3 Patentes relacionadas con la tesis	305