

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

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 les 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'atrada 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 les ones de baixa freqüència mitjançant l'ús 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 obtenir 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 utilitza 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 obtenir 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.