

PANTALLAS ACUSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE SEGUNDA GENERACION

PACS: 43.50.Ki

Sergio Castiñeira-Ibáñez¹, Constanza Rubio³, Juan Vicente Sánchez-Pérez³, Vicente Romero-García², Lluís Miguel Garcia-Raffi⁴

¹ Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: sercasib@mat.upv.es

² Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Paraninf 1, 46730 Gandía, Spain.

E-mail: virogar1@upvnet.upv.es

³ Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universtat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: crubiom@fis.upv.es; jusanc@fis.upv.es

⁴ Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

E-mail: lmgarcia@mat.upv.es

ABSTRACT

Noise control during its transmission is an environmental problem of first magnitude. In this paper we present an acoustic barrier design based on second generation of sonic crystals introducing several attenuation mechanisms. Sonic crystals are defined as a set of acoustic scatterers periodically arranged with noise control properties defined by a mechanism called "multiple scattering". The main characteristics of the combination of scattering, resonances and absorption in this type of acoustic barriers are explored and the advantages and disadvantages of their use are compared with the traditional ones.

RESUMEN

El control del ruido durante la fase de transmisión constituye un problema medioambiental de primera magnitud. En esta comunicación se presenta un diseño de pantalla acústica basada en cristales de sonido denominada de segunda generación, las cuales introducen diferentes mecanismos para la atenuación de sonido. Los cristales de sonido se definen como redes ordenadas de dispersores acústicos que presentan propiedades de control de ruido definidas por un mecanismo denominado "dispersión múltiple". Se analizan las principales características acústicas de la combinación de dispersión, resonancia y absorción en este tipo de barreras y se establecen las ventajas e inconvenientes de su uso comparados con las pantallas acústicas tradicionales.

PANTALLAS ACÚSTICAS. INTRODUCCIÓN

Una de las soluciones para el control del ruido en su transmisión viene dada por la utilización de pantallas acústicas. Una pantalla acústica clásica consiste básicamente en un medio continuo de material rígido que se interpone entre la fuente emisora de sonido y el receptor. Este tipo de pantallas presenta una atenuación debida fundamentalmente a la Ley de masas. El objetivo de este trabajo consiste en presentar unas pantallas acústicas alternativas a éstas, basadas en unos dispositivos hechos de una disposición periódica de dispersores acústicos inmersos en aire conocidos como cristales de sonido ([1], [2]). El mecanismo de control de

ruido utilizado por estos dispositivos se basa en el fenómeno de la "dispersión múltiple". Las investigaciones llevadas a cabo en los últimos años permiten definir pantallas acústicas basadas en cristales de sonido de primera y de segunda generación en función de los mecanismos de control de ruido involucrados en su diseño. Sánchez Pérez et al. [3] diseñaron la primera pantalla acústica basada en cristales de sonido aprovechando únicamente el proceso dispersión múltiple. Estas barreras se denominan en este trabajo de primera generación. Recientemente Romero-García et al. [4] han diseñado una barrera acústica que combina la dispersión múltiple, la resonancia y la absorción. Éstas últimas son las denominadas de segunda generación. Analicemos las dos posibilidades.

PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE PRIMERA GENERACIÓN. MECANISMO DE DISPERSIÓN MÚLTIPLE

Un cristal de sonido (CS) se puede definir como un medio heterogéneo formado por una red periódica de dispersores acústicos inmersos en aire ([1], [2]). Estos sistemas presentan una interesante propiedad que permite su uso como pantallas acústicas: la existencia de rangos de frecuencia en los que el sonido no puede transmitirse en el interior del cristal. En este proceso de dispersión múltiple, aparecen frecuencias de atenuación relacionadas con la periodicidad del sistema. El tamaño y la posición de estas bandas en el espectro de frecuencias dependen de varios factores [5]. Algunos de estos factores son: (i) tipo de ordenación de los dispersores; (ii) separación entre los dispersores; (iii) contraste de densidades y velocidades de propagación entre el medio y los dispersores; y (iv) cantidad de dispersor existente por unidad de área. Esta dependencia hace que la implementación de los cristales de sonido como pantallas acústicas no sea sencilla. Para el cálculo y el diseño de estas pantallas a lo largo de esta sección, se considerarán dispersores cilíndricos acústicamente rígidos.

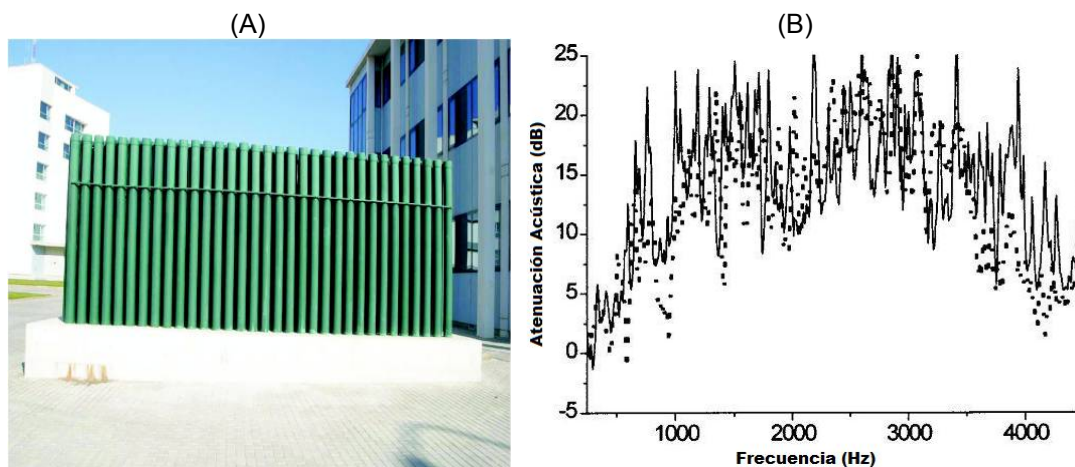


Figura 1. (A) Pantalla acústica basada en cristales de sonido de primera generación. (B) Pérdidas por inserción correspondientes a dicha pantalla medidas en banda fina y en el rango de bajas frecuencias [3]. La línea continua (punteada) representa los resultados en la dirección de 0° (30°).

La Figura 1A muestra una pantalla acústica basada en cristales de sonido de primera generación y la Figura 1B presenta los resultados obtenidos mediante esta pantalla. La mejoras de estas pantallas analizadas en los últimos años se basan en dos objetivos: (i) maximizar el mecanismo de la dispersión múltiple mediante la búsqueda de nuevas ordenaciones de dispersores cilíndricos ([6], [7]) y (ii) añadir nuevos mecanismos de control de ruido tales como la resonancia y la absorción en el diseño de los dispersores [4]. A las pantallas basadas en cristales de sonido con dispersores así mejorados las denominaremos de segunda generación.

PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO DE SEGUNDA GENERACIÓN. RESULTADOS

Estructuras de dispersores que combinan dispersión, absorción y resonancia montadas en una distribución optimizada o periódica, las denominamos de segunda generación. Varios han sido los diseños propuestos hasta la fecha. Así, Umnova et al [8] propusieron unos dispersores cilíndricos formados por un núcleo rígido y rodeados de material absorbente poroso. En este caso los mecanismos de control de ruido utilizados son la dispersión múltiple y la absorción. Otro diseño de dispersor propuesto consiste en la utilización de materiales rígidos que presenten propiedades resonantes ([9], [10]). En este tipo de dispersores la posición del pico de resonancia en el rango de frecuencias puede ser modulada variando las características geométricas del resonador. Aquí, los mecanismos de control involucrados son la dispersión múltiple y la resonancia. Un diseño de dispersor más avanzado utilizando los mecanismos de control anteriormente comentados consiste en la utilización de dispersores elásticos en los que aparezcan dos picos de resonancia debidas a fenómenos físicos distintos [11]. En este caso, al igual que el caso anterior, la posición de los picos de resonancia se puede modular dentro de un cierto rango cambiando la geometría del dispersor. Uno de los diseños más avanzados ha sido presentado por Romero García et al [7] que proponen un dispersor formado por material rígido, absorbente y con comportamiento de resonador, siendo en este caso tres los mecanismos de control de ruido involucrados. En la Figura 2 se puede ver el detalle de las secciones transversales de los cuatro tipos de dispersores comentados.

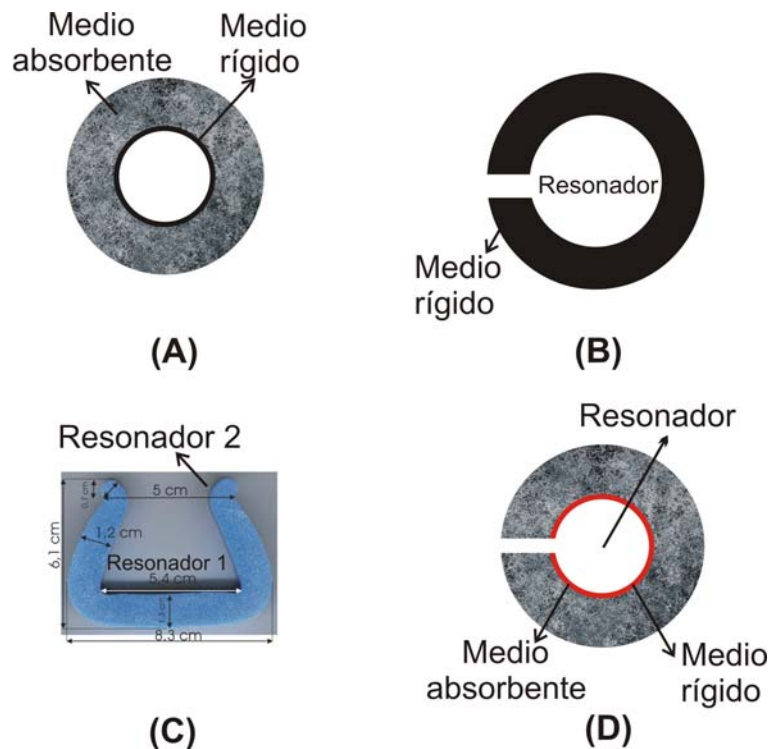


Figura 2.-Esquema de la sección transversal de los cuatro diseños de dispersores comentados.

La característica más importante de la implementación de pantallas acústicas con CS de segunda generación consiste en las amplias posibilidades de diseño que ofrecen para atenuar el ruido en distintos rangos de frecuencia. Por una parte la posición de los picos de atenuación debidos a la dispersión múltiple depende de la distribución espacial de los dispersores. Por otra, la posición de los picos de resonancia depende de la geometría del resonador. Finalmente los niveles de absorción dependen del volumen de material absorbente utilizado. Además, se ha demostrado que los efectos de control de ruido de los mecanismos implicados no interfieren

deconstructivamente, sino que se superponen constructivamente aumentando la capacidad global de atenuación del dispositivo en un amplio rango de frecuencias [4].

Como ejemplo se analiza a continuación la Figura 3, donde se observa la atenuación producida por un CS formado por dispersores que incluyen los mecanismos de dispersión múltiple, de absorción y de resonancia (Ver Figura 2D).

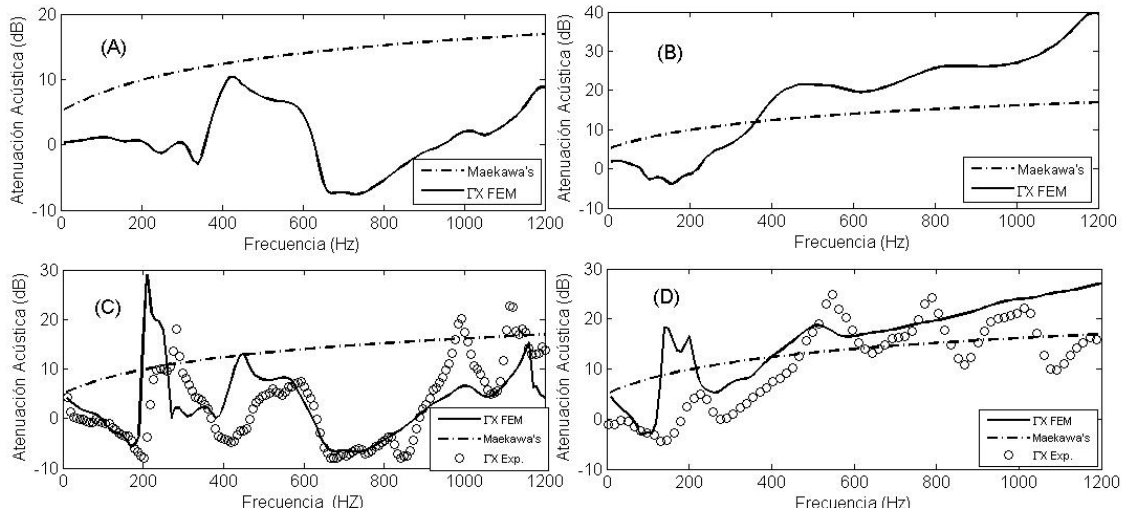


Figura 3.- Resultados numéricos y experimentales para las diferentes configuraciones de CS estudiadas. (A) Resultados numéricos para una estructura formada por dispersores rígidos. (B) Resultados numéricos para una estructura formada por dispersores rígidos con absorbente. (C) Predicciones numéricas (línea continua) y resultados experimentales (círculos) para una estructura rígida con efecto resonador. (D) Predicciones numéricas (línea continua) y resultados experimentales (círculos) para una estructura rígida con absorbente y resonador. En todos los casos se ha superpuesto la estimación de las pérdidas por inserción para una pantalla tradicional con el mismo espesor que el CS considerado según el método de Maekawa [4].

Los cálculos numéricos se muestran en las Figuras 3A y 3B para dispersores rígidos y para dispersores rígidos recubiertos de material poroso respectivamente. Para el caso de los dispersores rígidos, aparece un pico de atenuación en la dirección de incidencia 0° (Γ_X) entre 350 Hz y 600 Hz. Este pico es debido fundamentalmente al proceso de dispersión múltiple ya que la rigidez de los dispersores es la que está jugando un papel predominante en el proceso de atenuación. En el caso de los dispersores con absorbente, cuya sección se observa en la Figura 2A, se puede observar que aumenta la atenuación en todo el rango de frecuencias debido al material absorbente conservándose el pico de atenuación debido a la dispersión múltiple. En la Figura 3C se muestran los resultados para dispersores rígidos con cavidades resonantes, cuya sección se muestra en la Figura 2B. La frecuencia de resonancia del resonador está en 220 Hz. Este hecho se puede observar en la Figura 3C donde se aprecia también el buen acuerdo entre los resultados teóricos con los experimentales. En la figura podemos observar que el pico de resonancia se suma al de la dispersión múltiple, aumentando las propiedades de atenuación del sistema en el rango de bajas frecuencias. Por último los resultados para el CS formado por el dispersor rígido ranurado y que posee además material absorbente (ver Figura 2D), vienen indicados en la Figura 3D. Se observa una superposición positiva de los tres efectos de control de ruido, la dispersión múltiple de los cilindros rígidos, la resonancia debido a la abertura longitudinal realizada en cada uno de ellos y la capacidad absorbente del material que rodea a los dispersores.

Un aspecto interesante del diseño de estos últimos dispersores consiste en que el material absorbente añadido produce un incremento del espesor de la cavidad que hace que el pico

debido a la frecuencia de resonancia se desplace en el espectro de atenuación hacia bajas frecuencias debido a la modificación de la geometría del resonador, siendo este un resultado positivo ya que proporciona otra herramienta de diseño para atenuar bajas frecuencias (Figura 3D).

HOMOLOGACIÓN

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, Sonic Crystals Technologies ha diseñado y construido, para su homologación y puesta en el mercado, una pantalla acústica basada en SC de segunda generación, donde se han utilizado los últimos descubrimientos en el campo para maximizar todos y cada uno de los mecanismos de control de ruido que se han citado hasta ahora. Se han analizado distintas configuraciones de cilindros para aumentar la capacidad de atenuación de los CS optimizando el mecanismo de la dispersión múltiple. En este sentido nuestro grupo ha abierto una nueva línea de investigación basada en los ordenamientos fractales. Así se ha maximizado el efecto de la dispersión múltiple utilizando un ordenamiento de dispersores basado en el fractal "triángulo de Sierpinski" [12].

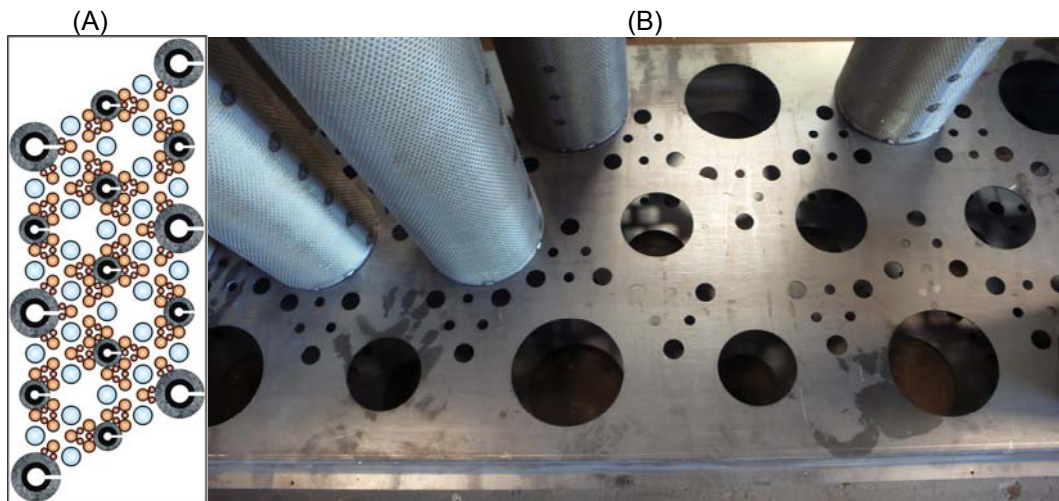


Figura 4.- (A) Representación en planta de la disposición de los cilindros en la pantalla homologada. (B) Detalle de la base de la estructura homologada donde se observa el ordenamiento cuasi-fractal seguido.

La base geométrica para la construcción de la pantalla, que se puede observar en la Figura 4A, es el resultado de un ordenamiento no periódico de los dispersores. Basado en este ordenamiento cuasi-fractal diseñamos la estructura final que se muestra en la Figura 4B. La forma externa de la estructura homologada es rectangular y está formada por cilindros de cuatro diámetros diferentes, dos de ellos con las características de los dispersores mencionados en el punto anterior y los otros dos más pequeños simplemente formados por cilindros rígidos.

Los dispersores más grandes están diseñados para introducir resonancia (debido a la cavidad), absorción (debido al material absorbente) y dispersión (debido al núcleo duro). Por tanto estos dispersores tienen tres partes: núcleo, cubierta y chapa perforada. El núcleo del dispersor está formado por un tubo acústicamente rígido, diseñado para introducir el mecanismo de la dispersión múltiple, realizado con hierro y ranurado longitudinalmente. La ranura permite que el sonido penetre en la cavidad y se produzcan resonancias. La cubierta es de lana de roca y cumple una triple función: introduce el mecanismo de la absorción aumentando la atenuación del dispositivo, varía las características geométricas del resonador produciendo una variación en la posición del pico de resonancia y protege al núcleo del deterioro producido por las inclemencias atmosféricas. La chapa perforada de hierro aporta rigidez estructural siendo

acústicamente transparente, envuelve a la lana de roca y ayuda a incrementar el fenómeno de dispersión múltiple. Cada tamaño de la cavidad resonante de los dispersores así contruidos introduce un pico de resonancia situado en una frecuencia distinta (220 Hz y 310 Hz en la Figura 5A). Los dispersores más pequeños son cilindros de hierro y contribuyen únicamente al fenómeno de dispersión múltiple.

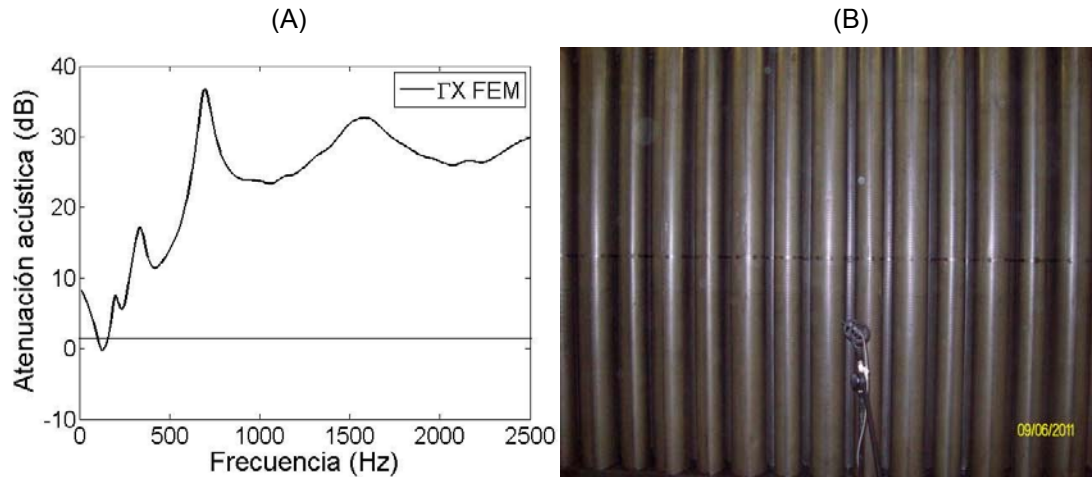


Figura 5.- Detalles de la pantalla homologada. (A) Simulación numérica del espectro de atenuación en un punto situado a 1 m detrás de la barrera, calculado en banda fina y para la orientación 0° (B) Vista frontal de la pantalla homologada en el momento previo a realizar los ensayos de absorción en sala reverberante.

En la Figura 5A podemos observar un ejemplo de espectro de atenuación acústica calculado numéricamente a un metro de distancia para la pantalla homologada y a incidencia 0°. En éste se observa la atenuación producida por las cavidades resonantes (220 Hz y 310 Hz), los dos primeros picos de atenuación debidos a la dispersión múltiple (800 Hz y 1600 Hz) y el aumento en el fondo de atenuación (a partir de 400 Hz) debida al material absorbente. El espectro ha sido calculado de forma numérica utilizando Comsol Multiphysics.

Esta estructura, si aspira a competir en el mercado al igual que cualquier otro tipo de barrera acústica, debe pasar un proceso de homologación acústica. Dicho proceso se ha llevado a cabo en la empresa de homologación Applus+ (Barcelona), compañía dedicada a ensayo, inspección, certificación y servicios tecnológicos. Se ha ensayado la pantalla en sala reverberante (UNE-EN ISO 1793-1:1998) para verificar el nivel de absorción de la pantalla y en sala de transmisión (UNE-EN ISO 1793-2:1998) para clasificar la pantalla ante el aislamiento a ruido aéreo. Las clasificaciones obtenidas para la absorción y aislamiento por el prototipo experimental han sido A-3 y B-2 respectivamente.

La pantalla acústica descrita en este proceso de homologación está protegida y sus derechos corresponden a la Universitat Politècnica de València (ref:R13346-2009).

CONCLUSIONES

En este trabajo, se han utilizado ordenamientos no periódicos de dispersores acústicos para diseñar una estructura formada por dispersores de paredes rígidas, que tienen cavidades resonantes y que están recubiertos de material absorbente, con el fin de construir una pantalla acústica alternativa a las pantallas clásicas. Estas estructuras muestran una superposición constructiva de los mecanismos físicos que intervienen en la atenuación del sonido (dispersión múltiple, resonancia y absorción) en el rango audible.

Las pantallas de cristales de segunda generación, mejoran los resultados obtenidos respecto a la atenuación de las pantallas de cristales de sonido de primera generación, donde el único efecto acústico que actúa es la dispersión múltiple.

La estructura diseñada produce niveles de atenuación comparables a los de las pantallas tradicionales, pudiendo competir con éstas bajo el punto de vista acústico.

La pantalla acústica basada en cristales de sonido de segunda generación y ordenamientos fractales que se presenta, ha sido homologada y permite ser utilizada como una alternativa a las pantallas acústicas tradicionales en determinadas condiciones y supuestos, introduciendo un avance tecnológico en el campo de las pantallas acústicas donde el diseño geométrico está directamente relacionado con el control de ruido conseguido por las mismas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el MEC (Gobierno español) y fondos FEDER (MAT2009-09438) y por la Universitat Politècnica de València a través del programa de Incentivo a la Innovación, INNOVA 2010. V.Romero García agradece el apoyo del “Programa de Contratos Post-Doctorales con Movilidad UPV (CEI-01-11)”.

BIBLIOGRAFÍA

[1] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. V. Sánchez-Pérez, V. Gómez, J. Linares and F. Meseguer, Sound attenuation by sculpture. *Nature*, **378**, 241 (1995)

[2] M. Sigalas and E. Economou, Attenuation of multiple-scattered sound. *Europhys. Lett.* **36**, 241 (1996)

[3] J. V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia y V. Gómez, Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. *Appl. Phys. Lett.* **81**, 5240 (2002)

[4] V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez and L. M. Garcia-Raffi, Tunable wideband bandstop acoustic filter based on two dimensional multiphysical phenomena periodic systems. *J. Appl. Phys.* **110**, 014904 (2011)

[5] M. Kushwaha, Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise. *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3218 (1997)

[6] V. Romero-García, E. Fuster, L. M. Garcia-Raffi, E. A. Sánchez-Pérez, M. Sopena, J. Linares, J.V. Sánchez-Pérez, Band gap creation using quasiordered structures based on sonic crystals. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 174104 (2006)

[7] V. Romero-García, L. M. García-Raffi, M Sopena, J.V. Sánchez-Pérez, J. M.Herrero, S. García-Nieto and J. Blasco. *Acoust. Soc. Am.* **125**, No. 6 (2009)

[8] O. Umnova, K. Attenborough and C. M. Linton, Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders. *J. Acoust. Soc. Am.*, **119** (1), 278 (2006)

[9] A.B., Movchan and S. Guenneau. Split-ring resonators and localized modes. *Phys. Rev B*, **70**, 125116, (2004)

[10] X. Hu and C. Chan, Two-dimensional sonic crystals with Helmholtz resonators, *Physical Review E*, **71**, 055601R, (2005)

[11] V. Romero-García, A. Krynkin, L.M. García-Raffi, O. Umnova, J.V. Sánchez-Pérez, Multi-resonant scatterers in Sonic Crystals: Locally Multi-resonant Acoustic Metamaterial, preprint arXiv: 1103.6283v1 (2011)

[12] S. Castiñeira-Ibáñez, V. Romero-García, J. V. Sánchez-Pérez and L. M. García-Raffi, Overlapping of acoustic bandgaps using fractal geometries. *EPL*, **92**, 24007 (2010)