

## PANTALLAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO

PACS: 43.28 Fp, 43.50 Lj, 43.20. +g

J. Redondo<sup>1</sup>, J.V. Sánchez-Pérez<sup>2</sup>, J. M. Fuster<sup>1</sup>, JM Barrigón<sup>3</sup>, P. Atanasio<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto para la Gestión integral de Zonas Costeras.-Universitat Politècnica de València. Campus de Gandía. C. Paranimf, 1. Grao Gandía (Spain) fredondo@fis.upv.es

<sup>2</sup>Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.-Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. Valencia (Spain)

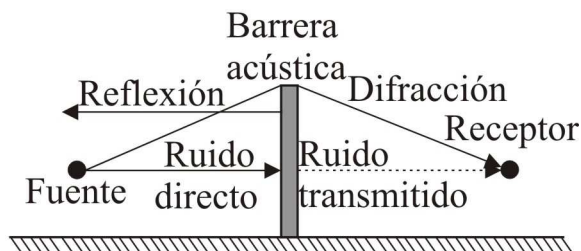
<sup>3</sup>Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura, 10003 Cáceres, (Spain)

### RESUMEN

La teoría de estructuras periódicas dio pie a la invención de difusores de sonido hace aproximadamente 40 años. Sin embargo, ha sido recientemente cuando algunos autores han comenzado a estudiar las posibles aplicaciones de un tipo de estructura periódica, los cristales de sonido, en su faceta de difusores de sonido. Este trabajo explora el comportamiento de los cristales de sonido utilizados como difusores de sonido en pantallas acústicas. Los resultados preliminares obtenidos mediante la técnica numérica conocida como FDTD muestran que pueden ser utilizados para reducir la polución sonora cerca de carreteras y vías de tren, principalmente dada la posibilidad de situarlos cerca de la fuente sonora, sin el habitual efecto de amplificación producido por múltiples reflexiones entre la fuente sonora y la barrera.

### INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas medioambientales en todo el mundo es el ruido, que se puede definir como todo sonido no deseado producido en el exterior y generado normalmente por los medios de transporte, por las industrias o por aglomeraciones humanas. El ruido se puede intentar controlar en su fase de generación, de transmisión o de recepción. Aunque lo ideal es controlarlo en su fase de generación, hay veces en que esto no es posible, y hay que intentar reducirlo en su fase de transmisión. Una de las soluciones básicas para su control en esta fase es la utilización de barreras o pantallas acústicas (1). Una barrera clásica se puede definir como un sistema continuo construido a base de materiales rígidos y con una densidad superficial de al menos  $20 \text{ kg/m}^2$  (2) que se interpone entre la fuente de ruido y el receptor (figura 1a). El efecto que produce la barrera sobre la transmisión del ruido desde la fuente al receptor se puede explicar de la siguiente manera: El ruido se transmite entre la fuente y el receptor en línea recta, en primera aproximación. Esta trayectoria se interrumpe cuando se instala la barrera y una parte de este ruido se refleja hacia la fuente, se transmite a través de la barrera, se absorbe o bien se difracta en el borde superior (figura 1b).



(a)

(b)

Figura 1: (a) Ejemplo de barrera acústica; (b) Efecto acústico de la interposición de una barrera entre la fuente y el receptor

Uno de los problemas que suele reducir la efectividad de las pantallas acústicas utilizadas para reducir el ruido en las vías de comunicación de tráfico rodado o ferroviario es la reflexión del ruido desde la barrera hacia la fuente. Debido a que las barreras suelen estar hechas habitualmente de materiales duros, una parte del sonido incidente se refleja hacia la fuente, pudiendo afectar a receptores que se encuentren detrás de la fuente (figura 2a). Este fenómeno puede aumentar cuando la fuente de ruido (vehículo o tren) se encuentra muy cerca de la barrera, de forma que el ruido puede llegar incluso a sobrepasar la barrera, reduciendo de forma significativa su efectividad. Esta reflexión múltiple o "efecto tambor" se puede explicar de forma sencilla: cuando una fuente de ruido de cierta longitud pasa cerca de una barrera, el ruido que produce incide sobre la barrera. Parte de ese ruido se refleja, pero vuelve a ser reflejado por la fuente que lo envía de nuevo hacia la barrera. Este proceso iterativo hace que la efectividad de la barrera disminuya (figura 2b). Este efecto puede llegar a ser especialmente importante en el caso del tráfico ferroviario, debido a la gran longitud que pueden tener los convoyes.

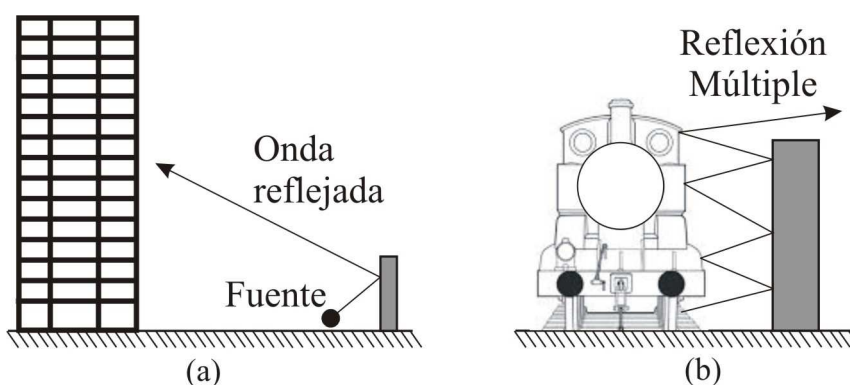


Figura 2: (a) Reducción de la efectividad de las barreras debido a la reflexión; (b) Reflexión múltiple o "efecto tambor"

Por otra parte, en los últimos años han aparecido unos nuevos materiales, denominados cristales de sonido (3), que han demostrado su eficacia en el control de la propagación de las ondas acústicas. Un cristal de sonido se puede definir genéricamente como un conjunto de dispersores cilíndricos rígidos y ordenados de forma periódica inmersos en aire. Estos sistemas se han utilizado para el diseño y fabricación de pantallas acústicas, (4), guías de ondas (5), lentes de sonido (6) o como difusores de sonido (7).

El objeto de este trabajo consiste en el estudio de posibles soluciones para la reducción de esta reflexión múltiple o “efecto tambor” utilizando cristales de sonido. La opción que se presenta consiste en el diseño de una pantalla mixta, formada por una barrera tradicional y por un cristal de sonido adyacente que actúa como difusor. Como herramienta de diseño se ha utilizado el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD en sus siglas en inglés), y los resultados que se presentan demuestran que las barreras mixtas así diseñadas disminuyen el efecto tambor, aumentando la efectividad de las barreras acústicas que trabajan en esas condiciones.

### DISEÑO DE LA BARRERA MIXTA. PARÁMETROS UTILIZADOS

La barrera mixta que se propone está basada en la propuesta de Redondo et al. (8). El difusor está formado por un cristal de sonido con 148 cilindros de radio 0,035m dispuestos en red rectangular. Pero mientras que el parámetro de red horizontal es constante,  $a=0,08m$ , el parámetro de red vertical adopta dos valores distintos,  $b=0,088m$  y  $c=0,072m$ , según tramos del cristal. Así, a lo largo del difusor nos encontramos con cuatro partes alternadas de dos en dos (difusor bizona). La altura total del difusor es de 2,95 m y su anchura de 0,315m . Por otra parte, la pantalla acústica clásica está formada por un paramento continuo de 3m de altura y 0,15m de anchura, siendo de 0,04m la distancia entre el difusor y la barrera clásica. Nótese que la barrera clásica hace el papel de panel trasero que normalmente se encuentra en un difusor. En la figura 3 se pueden observar las características geométricas de la barrera mixta diseñada. La figura 4 ilustra el coeficiente de difusión según la norma ISO (9).

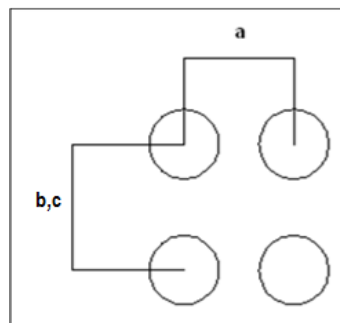
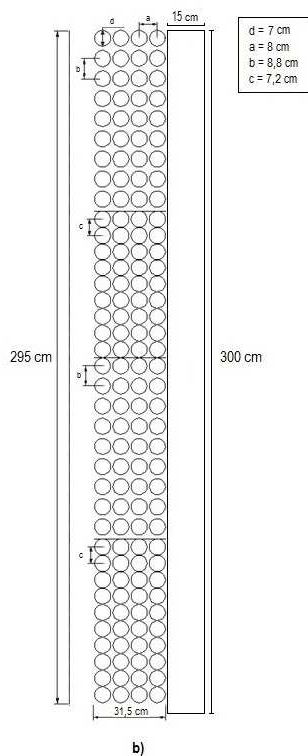


Fig. 3.- Izquierda: Sección de la barrera mixta diseñada. Se observa la estructura del difusor creado a partir de un cristal de sonido adyacente a una barrera acústica clásica formada por un paramento continuo. Derecha: Celda unidad rectangular del cristal de sonido que actúa como difusor. La distancia  $a=0,08m$  es constante en todo el cristal. Las distancias  $b=0,088m$  o  $c=0,072m$  definen las dos zonas del difusor bizona

Los factores de llenado de las celdas unidad de cada una de las dos zonas son:  $f_b=0,55$  y  $f_c=0,67$

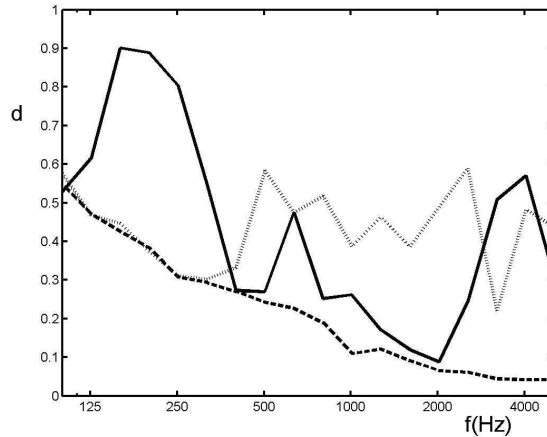


Fig. 4. Coeficiente de difusión frente a la frecuencia (en tercios de octava) de un panel plano (línea discontinua) el difusor basado en cristales de sonido (línea continua) y un difusor de residuo cuadrático de dimensiones similares (línea de puntos)

#### **MODELADO DEL PROBLEMA Y SIMULACIONES**

Para la simulación se ha utilizado el método de las diferencias finitas en dominio de tiempos (FDTD) (Para consultar los detalles del método ver la referencia 10). Basándonos en dicho método se ha recreado la vista en perfil de un espacio abierto en 2D, altura y longitud, que representa la linde de una carretera, en la que se ha instalado una pantalla acústica. Las dimensiones de este entorno son 6 metros de altura y 12 metros de longitud. La pantalla está situada a 2,5 metros del origen de coordenadas. En cuanto a las condiciones de contorno, el suelo y la pantalla (cristal incluido) son totalmente reflectantes, mientras que el resto del entorno presenta una frontera PML (10) totalmente absorbente, con el fin de simular un espacio abierto. En algunos de los casos se incluirá en la simulación un rectángulo de 4,1 metros de altura y 50 cm de profundidad, situado en el origen de coordenadas, que simula la parte lateral derecha de un camión y que será reflectante también. La fuente de ruido será omnidireccional y estará situada en el suelo a 50 centímetros del origen, simulando ser el ruido de rodadura emitido por los neumáticos. La señal de test emitida será una señal impulsiva de tipo Ricker (11). Se colocarán un total de 6 receptores, a una altura de 1,5 metros y a una distancia de 1,5 a 6,5 metros más allá de la pantalla, equiespaciados 1 metro de distancia entre sí. La separación entre los elementos de la malla de presiones y velocidades seguirá siendo de 1cm lo que permite simular correctamente frecuencias hasta aproximadamente 4000 Hz.

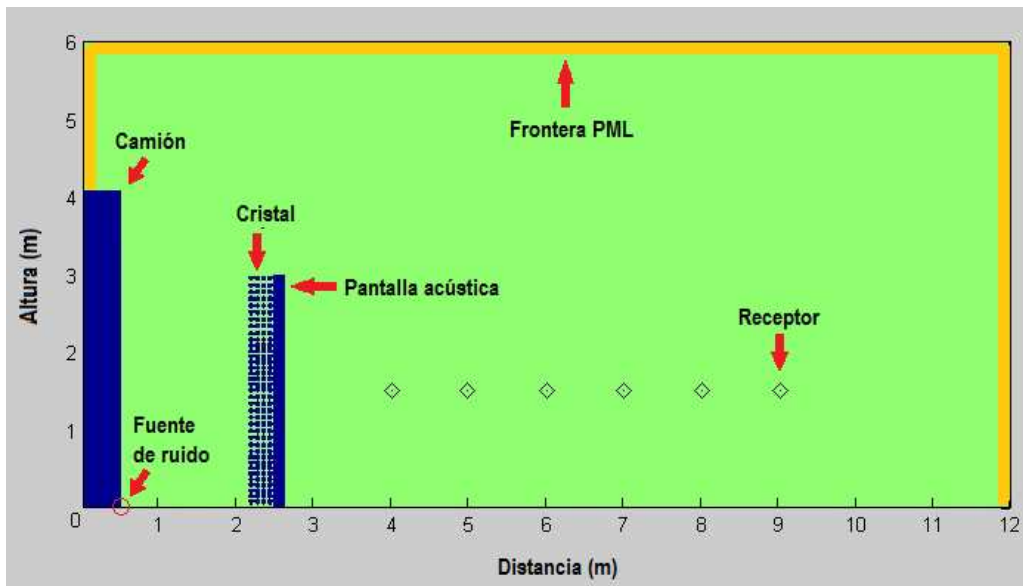


Fig. 5.- Modelo en 2D de la simulación para la pantalla acústica

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado, para cuantificar los diferentes casos estudiados, hemos utilizado, tal y como es habitual en este campo, el parámetro conocido como *pérdidas por inserción* (IL en sus siglas en inglés). Las pérdidas por inserción se pueden definir como la diferencia de nivel sonoro en una zona sin y con la barrera:

$$IL = 20 \log_{10} \left| \frac{P_{\text{sin barrera}}}{P_{\text{con barrera}}} \right| \quad (3)$$

Habitualmente, las barreras acústicas tienen una altura de 3m, mientras que los camiones de gran tonelaje tienen una altura de 4m, de forma que el vehículo suele ser más alto que la barrera. Por tanto, el primer paso en este estudio ha sido el análisis del efecto tambor que se produce entre los citados vehículos de gran altura y las pantallas acústicas. Para ello se han comparado las pérdidas por inserción (IL) en la zona protegida por la pantalla cuando hay un vehículo presente que supera la altura de la pantalla y cuando no hay vehículo, situando la fuente de ruido en el mismo punto en ambos casos. En la figura 6 se observan los resultados obtenidos:

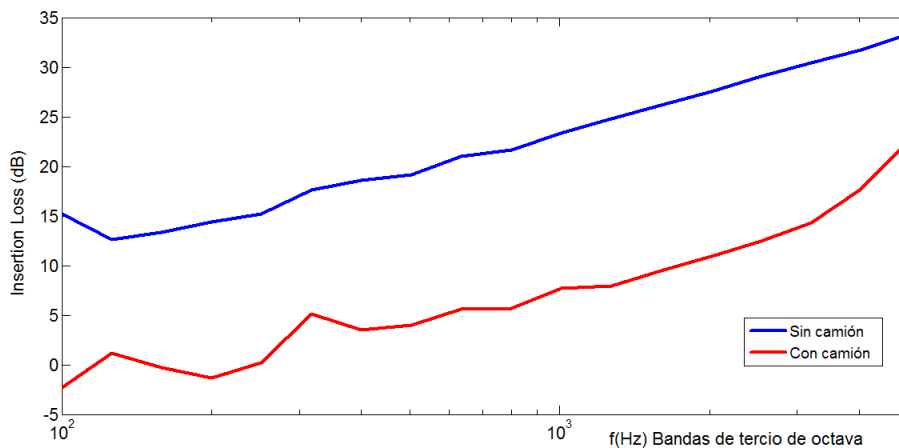


Fig. 6.- Pérdidas por inserción (dB) de una pantalla acústica, con y sin camión presente.

Como se puede observar la eficacia de la pantalla disminuye considerablemente cuando se produce el efecto tambor entre la misma y un vehículo que la supera en altura.

A continuación se ha calculado el IL en la misma zona del caso anterior en el caso de para una pantalla clásica y una pantalla mixta formada por una clásica a la que se le ha añadido el cristal de sonido diseñado, estando presente en ambos casos el camión. La figura 7 muestra los resultados obtenidos:

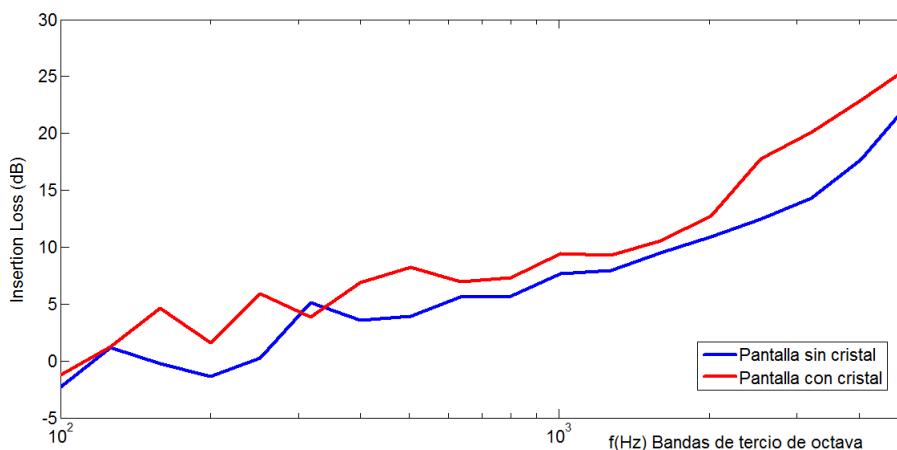


Fig. 7.- Pérdidas por inserción (dB) de una pantalla acústica, con y sin cristal presente.

A la vista de los resultados obtenidos se puede decir que el cristal es eficaz sobre todo a bajas frecuencias, llegando en algún caso a aumentar el IL en 5 dB.

La figura 8 muestra la diferencia de las pérdidas por inserción entre las situaciones sin cristal y con cristal estando siempre presente el camión para una excitación de baja frecuencia (bandas de octava de 125 y 250 Hz). Las zonas por encima de 0 dB (de color amarillo a rojo) indican que la presión es mayor en esas zonas en el caso de la pantalla sin cristal. Este hecho indica claramente la mejora en el control del ruido cuando se utilizan las pantallas mixtas diseñadas.

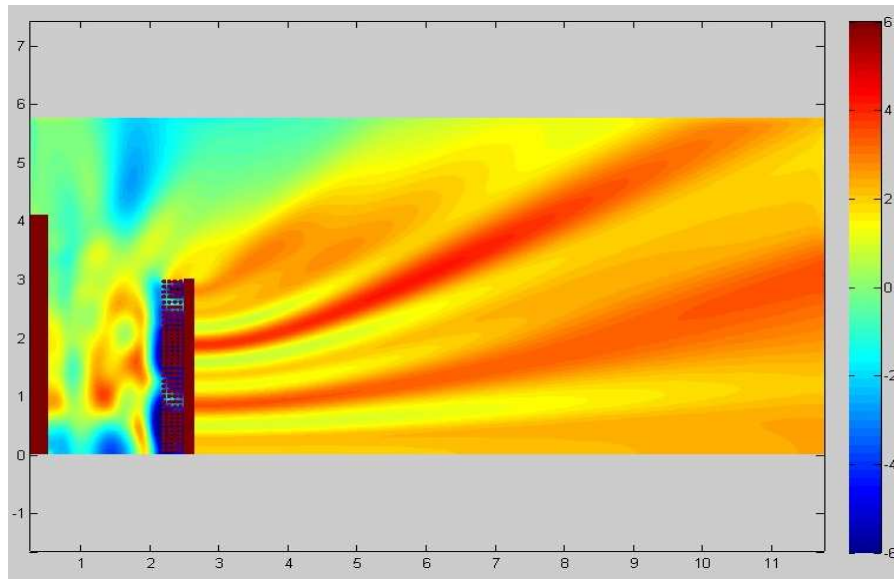


Fig. 8.- Diferencia del campo de presiones, con y sin cristal presente.

### CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos muestran que el cristal de sonido es un buen complemento para las pantallas acústicas, ya que reduce el efecto tambor y aumenta las pérdidas por inserción en estos dispositivos. La reducción del efecto tambor a bajas frecuencias es interesante ya que las pantallas acústicas convencionales suelen ser bastante ineficaces frente a longitudes de onda grandes.

Como posible línea futura se plantea la repetición del estudio con una pantalla acústica y un cristal de sonido a escala, para comparar los resultados obtenidos en la simulación con una medición in situ de las pérdidas por inserción.

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea FEDER a través del proyecto FIS2011-29731-C02-02.

### REFERENCIAS

- (1) Harris, CM. (1991). Handbook of acoustical measurements and noise control, 3rd ed. McGraw-Hill, 1991.
- (2) Department of Transportation, Federal Highway Administration U.S.A. (2001). Keeping the Noise Down. Highway Traffic Noise Barriers. Washington, 2001. FHWA-EP-01-004 HEPN/2-01 (10M)E.
- (3) Martínez-Sala, R., Sancho J., Sánchez-Pérez J.V., Gómez V., Llinares J. and Meseguer F. (1995). Sound attenuation by sculpture. Nature, 378, 241.
- (4) Sánchez-Pérez J.V., Rubio C., Martínez-Sala R., Sánchez-Grandia R. and Gómez V., (2002), Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. Appl. Phys. Lett. 81, 5240.
- (5) Khelif A., Choujaa A., Benchabane S., Djafari-Rouhani B., Laude V. (2004), Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic cristal waveguides. Appl. Phys. Lett. 84, 4400.
- (6) Cervera F., Sanchis L., Sánchez-Pérez J.V., Martínez-Sala R., Rubio C., Meseguer F. (2002), Refractive acoustic devices for airborne sound. Phys. Rev. Lett. 88, 023902.

- (7) Hughes R. J., Angus J.A.S., Cox T.J., Umnova O., Gehring G.A., Pogson M., Whittaker D.M. (2010), Volumetric diffusers: pseudorandom cylinder arrays on a periodic lattice. J. Acous. Soc. Am. 128, 2847
- (8) J. Redondo, R. Picó and V.J. Sánchez-Morcillo, The potential for phononic sound diffusers, J. Building Acoust. 18, 37-46 (2011)
- (9) ISO 17497-2:2012 "Measurement of sound scattering properties of surfaces — Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field"
- (10) X. Yuan, D. Borup, J. W. Wiskin, M. Berggren, R. Eidsens, S. A. Johnson: Formulation and validation of Berenger's PML absorbing boundary for the FDTD simulation of acoustic scattering. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control 44 (1997) 816–822
- (11) N. Ricker: Wavelet contraction, wavelet expansion, and the control of seismic resolution. Geophysics 18 (1953) 769– 792.