

## DIFUSORES DE SONIDO BASADOS EN CRISTALES ACÚSTICOS

PACS: 43.55.Ka, 43.55.Br, 43.58.Ta, 43.20.Fn

J.Redondo<sup>1</sup>, Victor Sánchez-Morcillo<sup>1</sup>, R.Picó<sup>1</sup>, J.M. Fuster<sup>1</sup>, P.Atanasio, Wieslaw Woszczyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto para la Gestión integral de Zonas Costeras.-Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Gandía. C. Paranimf, 1. Grao Gandía (Spain)

E-mail: [fredondo@fis.upv.es](mailto:fredondo@fis.upv.es)

<sup>2</sup> McGill University. Schulich School of Music. Montreal, (Canadá)

### RESUMEN

En los últimos años, varios autores han considerado la posible aplicación de un tipo particular de estructuras periódicas, los cristales de sonido, en el campo de la Acústica de Salas. Este artículo explora la posible aplicación de estructuras periódicas utilizadas como difusores de sonido en una sala. Las simulaciones, realizadas con FDTD, y los experimentos muestran que debido a la inherente dispersión temporal proporcionada por una estructura periódica, se pueden utilizar para reducir o incluso eliminar, los efectos perniciosos asociados con los modos de baja frecuencia de una sala.

### INTRODUCCIÓN

Recientemente, ha habido un creciente interés en el estudio de las ondas acústicas y elásticas en materiales de composición periódica [1,2]. Debido a la periodicidad de la estructura, puede haber intervalos de frecuencia en los que las ondas no se propaguen, dando lugar a *bandas prohibidas*. Son análogas a los '*band gaps*' en cristales fotónicos. Estos materiales se denominan, por analogía, cristales de sonido o fonónicos. El interés en los cristales sónicos proviene de los numerosos efectos de este tipo de estructuras junto con el potencial para el desarrollo de modelos teóricos precisos. Todo ello hace de los cristales sónicos elementos prometedores en los estudios fundamentales de las propiedades de materiales altamente dispersivos.

Un cristal sonoro se compone básicamente de una serie de inclusiones dispuestas periódicamente en un medio de propagación. Para un cristal de dos dimensiones sonoras, las inclusiones son cilindros dispuestos en forma de red cuadrada o triangular, por ejemplo. Tienen que ser de un material diferente del material anfitrión, que suele ser un fluido. El concepto de *banda prohibida* se puede entender teniendo en cuenta la interferencia de las ondas dispersas al multiplicarse dentro de un cristal sonoro. Cuando un conjunto de dispersores se coloca periódicamente, las ondas quedan muy dispersas entre un obstáculo y el obstáculo contiguo, y terminan llenando todo el espacio disponible y propagándose en todas las direcciones posibles. Interfieren constructiva o destructivamente, dependiendo de la frecuencia de las ondas y de la

geometría de los cristales sónicos. Una *banda prohibida* aparece cuando las ondas dispersadas interfieren de forma destructiva en una dirección dada, de modo que su superposición disminuye exponencialmente al atravesar el cristal.

Cuando la *banda prohibida* existe en todas las direcciones de propagación, se denomina una *banda prohibida completa*. Un ejemplo de cristal sonoro que posee una *banda prohibida completa* sería un espejo perfecto, reflejando todas las ondas incidentes. De hecho, las ondas que incidieran en el cristal sonoro no podrían penetrar en él. Estas propiedades son estrictamente ciertas para las frecuencias que caen dentro de la *banda prohibida*. Para otras frecuencias, las interferencias destructivas son equilibradas por las constructivas y las ondas se transmiten por lo menos parcialmente.

En términos generales, las *bandas prohibidas* aparecen cuando la longitud de onda (el período de repetición espacial de la onda) es del orden del período espacial de los cristales sónicos. Otro punto esencial es que los principios de los cristales sónicos se expresan de la misma manera sea cual sea la escala elegida para su realización, aunque cambien las frecuencias de trabajo. La escala de la estructura se rige por la longitud de onda de la onda de sonido, o más precisamente, por las frecuencias de sonido en las que estamos interesados en actuar.

La mayoría de los trabajos anteriores han explorado las propiedades de transmisión de los cristales sónicos, en busca de barreras acústicas eficaces, o dispositivos con la capacidad de manipulación de la difracción del sonido (colimación, enfoque, etc.). Aquí se explora el potencial de los cristales sónicos como difusores de sonido eficientes.

## DIFUSORES DE SONIDO

Hace ya más de tres décadas desde que Schröder propuso por primera vez los difusores de sonido [3]. El sonido que incide sobre una superficie normal, se refleja en la dirección especular, es decir, la dirección que cumple la ley de Snell. Por el contrario, un difusor de sonido refleja el sonido en varias direcciones, en el caso ideal, en todas las direcciones posibles. Es bien sabido que los difusores de sonido puede mejorar el rendimiento acústico de las salas de diferentes maneras, por ejemplo, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos, focalizaciones y la coloración. Sin embargo, la efectividad de estas estructuras depende en gran medida de la habitación en particular en la que están instaladas. En otras palabras, no hay modelos para predecir hasta qué punto un difusor de sonido puede mejorar en cualquier sentido las propiedades acústicas de una sala.

A pesar de este problema, hay dos métodos principales para caracterizar cuantitativamente los difusores de sonido:

El primero, estandarizado por la AES [4], se basa en la medición del sonido reflejado en un amplio rango de ángulos. Para este propósito se debe obtener la respuesta al impulso. Un micrófono se mueve a lo largo de una semicircunferencia (o más de un hemisferio completo de evaluación de tres dimensiones), centrada en el punto medio de la muestra. El sonido directo se elimina con un enventanado adecuado de la señal. La caracterización completa del difusor se realiza en el ángulo de incidencia que varía de -90 a 90 grados. Para garantizar las condiciones de campo lejano son necesarios grandes entornos anecoicos. Los modelos a escala ofrecen una solución simple a este problema físico, pero la técnica sigue empleando mucho tiempo si varios ángulos de incidencia son considerados. El parámetro medido con esta técnica se conoce como el "coeficiente de difusión" y se define de la siguiente manera:

$$d = \frac{\left( \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left( 10^{L_i/10} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left( 10^{L_i/10} \right)^2} \quad (1)$$

siendo  $d$  el coeficiente de difusión,  $L_i$  es el nivel de presión sonora del sonido reflejado en la posición de medición  $i$ , y  $n$  es el número de posiciones de medición.

El segundo método de medida ha sido recientemente estandarizado por la ISO [5]. Este método permite la extracción directa de un parámetro conocido como "coeficiente de dispersión" bajo la suposición de que el sonido dispersado no es coherente. La técnica por lo tanto, aprovecha ciertas características temporales del sonido dispersado. La muestra de ensayo se introduce en una cámara reverberante, y se obtienen las respuestas al impulso para las diferentes orientaciones de la misma. Usando el promedio sincronizado de estas respuestas al impulso, el sonido reflejado de manera difusa es eliminado y se obtiene la respuesta al impulso en una sala virtual. A partir de la respuesta al impulso se obtiene un pseudo-coeficiente de absorción de manera análoga al método de Sabine. Por último, un coeficiente de dispersión se obtiene de esta pseudo-coeficiente de absorción.

### **CRISTALES DE SONIDO COMO DIFUSORES ACÚSTICOS**

La forma más sencilla de cristal de sonido para aplicaciones en Acústica de Salas es una estructura periódica de los dispersores en 2D, es decir, un conjunto de cilindros equidistantes, con un panel rígido posterior. Hay aplicaciones de los cristales sónicos en otros campos de la acústica, como las barreras acústicas contra el ruido, que no tienen panel rígido posterior. Los cristales de sonido con panel rígido posterior solo se utilizarán en espacios cerrados.

Con el fin de probar el rendimiento de un cristal simple, hemos implementado una simulación en 2D de esa estructura mediante la técnica de diferencia de elementos finitos en el dominio del tiempo (FDTD), siguiendo el estándar AES para la caracterización de difusores de sonido. Se ha elegido la técnica FDTD debido a que esta solución ofrece de manera intrínseca un análisis en el dominio del tiempo del método. Esto nos permitirá investigar la dispersión temporal [6] producido por los cristales sónicos.

La Figura 1 ilustra la muestra estudiada. En cuanto a las simulaciones con la técnica FDTD se considera tan sólo un área pequeña alrededor de la zona de ensayo. Todos los cálculos se han llevado a cabo en una red que comprende aproximadamente 400 por 700 elementos, cada uno con un tamaño aproximado de 1 cm. Con el fin de operar con un número de Courant lo más cercano a 1 como sea posible, la frecuencia de muestreo es de 10 KHz. Para frecuencias superiores a 10 KHz la dispersión numérica debe ser lo suficientemente importante como para enmascarar el sonido reflejado. El esquema numérico es excitado por una fuente lineal colocada en el lado derecho del área de integración en el que se sitúa el espécimen a estudiar (ver figura 1). Se registran las respuestas impulsivas correspondientes a la presión y la velocidad de las partículas en campo cercano sobre la línea de transformación a campo lejano con el fin de obtener la presión sonora en los 37 lugares de campo lejano a una distancia de 50 metros de la muestra con ángulos entre 90 y -90 grados y con un paso de 5 grados. Como uno de nuestros propósitos es el de comprobar el tiempo de difusión previsto por los cristales sónicos, es muy importante utilizar señales de excitación tan impulsivas como sea posible. Hemos utilizado wavelets de Ricker con frecuencias centrales de 250 Hz y en 2 KHz, que cubre todas las bandas de frecuencias de interés en la caracterización del difusor. Más detalles de la simulación FDTD se pueden encontrar en [6]. En algunos de los casos particulares

desarrollados para el presente trabajo el tamaño de la malla ha sido modificado para reproducir mejor las geometrías bajo investigación.

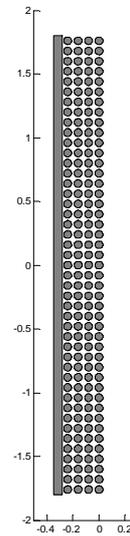


Figura 1. Superficie considerada. Nótese el panel rígido posterior

La muestra de ensayo es un conjunto de cilindros con un radio de 3 cm y una distancia entre los centros de cada uno de ellos de 8 cm. La constante de red, es decir, la distancia entre los elementos, se ha elegido lo suficientemente pequeña como para tener una *banda prohibida* dentro del rango típico de interés en la acústica de la sala. La *banda prohibida* se espera que aparezca para las frecuencias que tienen una longitud de onda dos veces la distancia entre los elementos. El radio de cada elemento ha sido elegido lo suficientemente grande como para obtener un grado de llenado lo más grande posible para tener una *banda prohibida* ancha. Con estos parámetros la *banda prohibida* se espera que aparezca en torno a 2500 Hz. La muestra cuenta con un panel rígido posterior, dado que lo que estamos estudiando es su posible aplicación en Acústica de la Salas, y por lo tanto, se va a utilizar para cubrir superficies planas. La distancia entre los últimos elementos y la superficie plana es la mitad de la distancia entre los elementos para asegurar que el sonido reflejado ve un cristal más grande sin ningún tipo de discontinuidad. La muestra de ensayo es de 3,6 metros de ancho para minimizar los efectos de borde. Dado que el interés de este trabajo es la aplicación de los cristales como difusores de sonido, el espesor total de la muestra es limitado. En particular vamos a considerar sólo cuatro periodos (ver figura 1) en la dirección normal, por lo que el espesor total es de unos 40 cm. Como referencia de un difusor convencional vamos a comparar los resultados con los obtenidos en [6] para un difusor de sonido QR cuyo rango frecuencial de trabajo está entre 550 Hz y 2000. La profundidad máxima de los huecos del difusor es de unos 20 cm y la anchura total es de 3,6 metros, exactamente la misma que en los cristales sónicos.

El primer resultado es el patrón polar del sonido reflejado por el cristal de sonido. Hemos observado que para las frecuencias en torno a la *banda prohibida* se refleja principalmente en tres direcciones, la dirección especular ( $0^\circ$ ) y  $50^\circ \pm$ . Se debe señalar que para las frecuencias de 800 Hz, que corresponde a casi un tercio de la frecuencia de *banda prohibida*, se observan dos lóbulos laterales cerca de la dirección especular. Una vez obtenido el nivel de presión sonora para cada ángulo y frecuencia, se puede calcular el coeficiente de difusión (ver ecuación 1). En la figura 2 el coeficiente de difusión se representa frente a la frecuencia de las dos superficies consideradas. Estos resultados preliminares muestran que el cristal de sonido es eficiente sólo para dos rangos de frecuencia pequeños: el correspondiente a la *banda prohibida* (2000 Hz) y otro en un tercio de la frecuencia de la *banda prohibida* (850Hz).

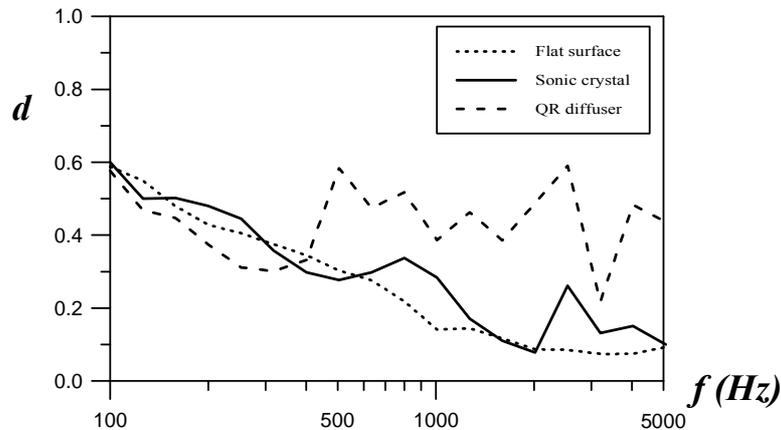


Figura 2. Coeficiente de difusión frente a la frecuencia de un panel plano (línea de puntos), un cristal de sonido con pared posterior (línea sólida) y un difusor QR (línea a trazos). Todas las superficies tienen una anchura de 3.6 m

A primera vista, los cristales de sonido no parecen ser una posibilidad prometedora, especialmente si se considera que para las pruebas que hemos hecho con valores pequeños del factor de llenado, la actuación como difusores de sonido es aún más pobre. Sin embargo, hay varias posibilidades que deben ser investigadas, tales como el uso de *chirped crystals*, la combinación con resonadores de cavidad, y así sucesivamente. En la siguiente sección se investiga la primera de estas nuevas posibilidades.

### MODIFICACIÓN DEL CRISTAL

Una de las posibles modificaciones del diseño original es modificar los parámetros del cristal mediante una modulación. Los cristales en los que se modifica la distancia entre los elementos en una o más direcciones se conocen como "*Chirped crystals*". Estas estructuras modificadas se utilizan comúnmente para obtener un cambio progresivo de la impedancia acústica eficaz a fin de optimizar la transmisión. Sin embargo, como estamos trabajando con algunos elementos en la dirección de incidencia del sonido, no tiene sentido modificar la constante de red (la distancia entre los elementos), en la dirección  $x$  (dirección normal a la pared). Después de varios intentos de modificar los parámetros de control, sólo para algunos casos se ha observado un débil incremento del coeficiente de difusión en las frecuencias bajas. En una segunda modificación, se ha probado un cristal en el que la constante de red cambia abruptamente entre dos valores extremos, o en otras palabras, la variación suave del parámetro de red se sustituye por una onda cuadrada. Esta estructura se ilustra en la figura 3. Para este caso particular, hemos observado que con grandes valores del factor de llenado se obtiene un gran aumento del coeficiente de difusión a bajas frecuencias, (ver gráfico 4).

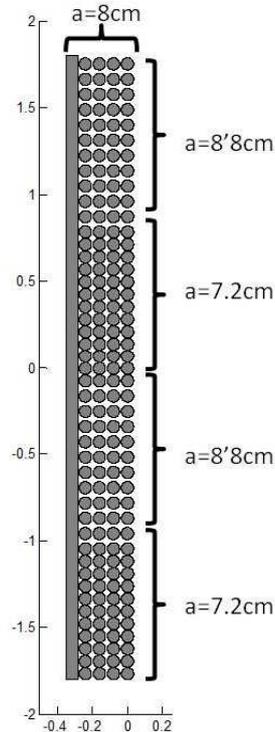


Figura 3. Segunda muestra considerada. La distancia entre elementos varía abruptamente a lo largo de la dirección paralela a la pared en tres puntos.

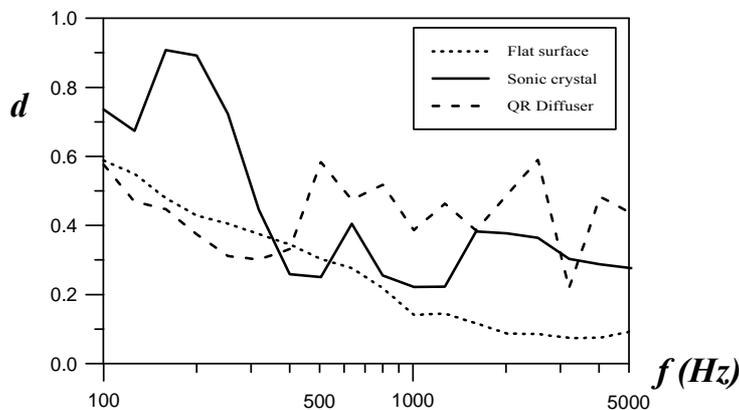


Figura 4. Coeficiente de difusión frente a la frecuencia de un panel plano (línea de puntos), un cristal de sonido modificado (línea sólida) y un difusor QR (línea a trazos). Todas las superficies tienen una anchura de 3.6 m

Con el propósito de verificar las prometedoras capacidades del difusor diseñado en el rango de las bajas frecuencias hemos construido un modelo a escala 1/5 y lo hemos caracterizado según la norma AES [4] en cámara anecoica (ver figura 5). Los resultados experimentales se observan en la figura 6. Los valores obtenidos son muy superiores a las simulaciones lo cual es achacable al hecho de trabajar con una distancia difusor-micro claramente insuficiente. Tan sólo podemos tomar en cuenta los resultados experimentales de manera cualitativa. En cualquier caso se observa que el difusor es claramente más eficiente en baja frecuencia que la superficie plana de referencia.

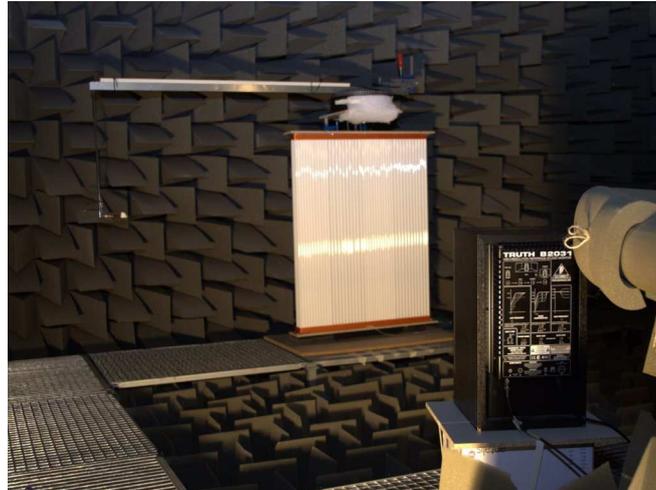


Figura 5. Difusor basado en cristales de sonido –chyrped medido en cámara anecóica. El micrófono, suspendido de una vara metálica se puede observar en la parte izquierda de la foto.

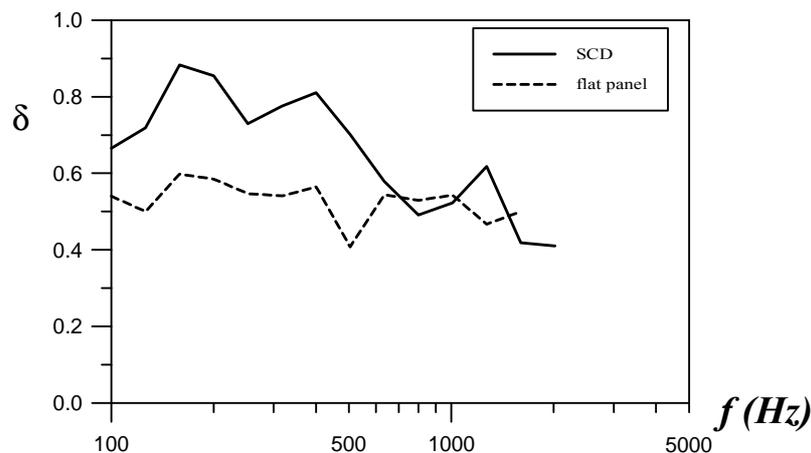
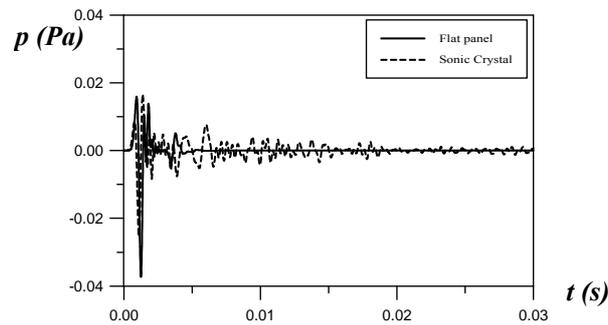


Figura 6. Coeficiente de difusión frente a la frecuencia de un panel plano (línea de puntos) y un cristal de sonido modificado (línea sólida) obtenidos experimentalmente en un modelo a escala. Las frecuencias se han modificado para que corresponden al difusor a tamaño real mostrado en figuras anteriores (anchura de 3.6 m)

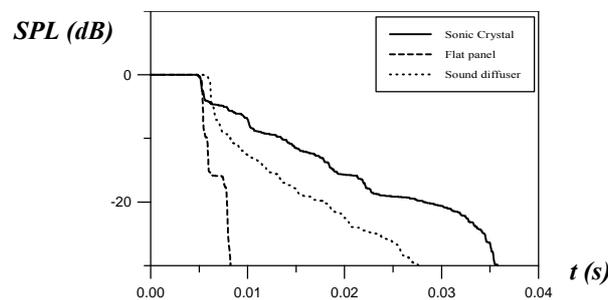
## TIME SPREADING

Es bien sabido que el difusor de sonido clásico ofrece no sólo una dispersión espacial, sino también temporal del sonido reflejado. El algoritmo FDTD que se ha utilizado para obtener el coeficiente de difusión, permite investigar el tiempo de propagación. A continuación se presentan los resultados y las conclusiones preliminares.

La figura 7 la respuesta temporal de las reflexiones de las superficies consideradas para una dirección de reflexión de  $0^\circ$  (zona de especular). En la figura 7, a fin de presentar un análisis completo de los resultados, hemos realizado una retro-integración de la respuesta al impulso (Integral de Schröder [7]) para obtener tiempos característicos de la relajación de las reflexiones. Esto es análogo al tiempo de reverberación en Acústica de Salas.



**Figura 7.** Presión Sonora reflejada en la dirección especular frente al tiempo: panel plano (línea continua), difusor a base de cristales de sonido (línea a trazos)



**Figura 8.** Retro integración de las señales impulsivas (solo sonido reflejado) a 0 grados frente al tiempo: Cristal de sonido(línea continua), panel plano (línea a trazos), difusor QR (línea de puntos).

Una evaluación de los resultados utilizando las diferentes superficies consideradas anteriormente indica que, sin considerar en detalle las variaciones espectrales, por lo general, se puede decir que los cristales de sonido proporcionan un tiempo de difusión aún más grande que los difusores de sonido convencionales. Es particularmente interesante que para bajas frecuencias el uso de cristales en los que la distancia entre los elementos no es constante, el tiempo de propagación sea extraordinariamente grande. Por el contrario, los cristales con una pequeña fracción de llenado, producen un tiempo de dispersión muy corto. Todavía no está claro cuál es la relación entre el tiempo de dispersión producido por las superficies interiores en una sala y sus características acústicas. Por ejemplo, la correlación cruzada de las señales medidas debe ser modificada por estas características de las reflexiones. El coeficiente de correlación cruzada interaural (IACC) está fuertemente asociado con la percepción subjetiva del 'espacialidad' [8-9]. Incluso es posible que las modificaciones de la dispersión temporal tengan implicaciones para la función de transferencia de modulación y por lo tanto, la inteligibilidad del habla.

## CONCLUSIONES

Para evaluar el potencial de los cristales acústicos como difusores de sonido se ha empleado un esquema de diferencias finitas. Se ha demostrado que el uso de *Chirped Crystals* puede mejorar el rendimiento de los cristales acústicos como difusores de sonido, especialmente en bajas frecuencias. Además, los resultados preliminares sobre las características de las reflexiones en el dominio de tiempos de este tipo de estructuras demuestran que aún puede proporcionar un tiempo de difusión mayor que los difusores de sonido convencionales. Sin embargo se debe seguir investigando con el fin de evaluar hasta qué punto el tiempo de difusión producido por las superficies puede mejorar las propiedades acústicas de un espacio determinado.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y a la Unión Europea FEDER a través del proyecto FIS2008-06024-C02-03 y el Proyecto de I+D para grupos de investigación emergentes GV/2011/055.

## REFERENCIAS

1. T. Miyashita, Meas. Sci. Technol. 16, R47 (2005)
2. J. H. Page et al., Phys. Status Solidi B 241, 3454 (2004).
3. M.R. Schroeder , "Diffuse Sound Reflection by Maximum Length Sequences", J. Acoust. Soc. Am. 57, No. 1, 149-150 (January 1975).
4. AES information document for room acoustics and sound reinforcement systems — Characterization and measurement of surface scattering uniformity. Audio Engineering Society. (2001)
5. ISO 17497-1:2004, "Acoustics -- Sound-scattering properties of surfaces -- Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room"
6. J. Redondo, R. Picó, B. Roig, M. R. Avis, "Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes", Acta Acustica united with Acustica. 93, 4, 611-622, (2007)
7. Schroeder, M.R., "New Method of Measuring Reverberation Time". J. Acoust. Soc. Am., vol. 37 (1965)
8. Kendall, G.S.: 'The decorrelation of audio signals and its impact on spatial imagery', Computer Music Journal, vol. 19 pp.71-87 (1995).
9. Hidaka, T., Beranek, L.L. and Okano, T. 'Interaural cross-correlation, lateral fraction and low and high frequency sound levels as measures of acoustical quality in concert halls', Journal of the Acoustical Society of America, vol. 98, no. 2, pp. 988-1007. (1995)