

Diseño y caracterización de absorbedores acústicos, a la carta, en geometrías realizadas en materiales de construcción.

Pedro Huertas Gallardo*

Resumen Uno de los problemas de la sociedad moderna es el ruido. Existen varios métodos de actuación para reducir su efecto nocivo. El primero de ellos, intentar reducir su generación, el segundo, aislarnos del mismo, y por último, intentar atraparlo o absorberlo. De una primera ojeada a los materiales que se utilizan en la construcción, vemos que se comportan como espejos casi perfectos para el sonido. Esto quiere decir, que el sonido rebota en las paredes y suelo, produciendo amplificaciones del ruido, debido a las múltiples reflexiones que se producen. Por otro lado, la mayoría de los materiales absorbedores del sonido producen gases tóxicos, que en caso de incendio, podrían ser especialmente peligrosos en túneles o naves industriales. El objetivo de esta línea de investigación, ha sido transformar los materiales, que se utilizan en la construcción, para conseguir que se comporten como absorbedores activos para el ruido. La construcción de estructuras geométricas, nos permite el diseño de trampas acústicas a la carta, que reducen el ruido de forma activa en las frecuencias deseadas. A continuación, se presenta un resumen del trabajo que hemos realizado hasta el momento actual.

*Departamento de Física Aplicada. Escuela Politécnica de Cuenca, Campus Universitario s/n, 16071 Cuenca, Spain, Pedro.Huertas@uclm.es

Introducción

La Escuela Politécnica de Cuenca, EPC, nace en 1994 como Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica en un campus en el que no existía ninguna carrera de ciencias o ingeniería. Unos años después, año 1998, se amplía la oferta con la titulación de Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad sonido e imagen. Desde el departamento de física aplicada, hemos intentado contribuir, con la modestia de nuestra representación, a poner en marcha los laboratorios de investigación científica, LACAE y LAMARE, que vieron la luz durante los años 2003-2004, además de la docencia en ambas titulaciones. Por criterios posibilistas, reorientamos la experiencia investigadora en microelectrónica y materiales semiconductores, a la línea que se describe en este trabajo, al valorar que podría encuadrar mejor en las dos enseñanzas puestas en marcha y, por otro lado, que ayudaran a fijar equipos de investigación en el propio campus de Cuenca, y particularmente, en la EPC.

El primer trabajo, con carácter oficial, en el que participamos fue el estudio de hormigones para radioterapia (Huertas y Quintana, 2005). La ejecución de este proyecto puso de manifiesto dos resultados importantes. En primer lugar, constatamos las limitaciones de la eficacia del tubo de impedancias en la medida de la absorción acústica del hormigón. También, pudimos comprobar que este comportamiento era extensible al resto de materiales de construcción: yeso, madera, etc., con absorción acústica casi nula, como se muestra en la figura 1, en el que se comparan los espectros de absorción de algunos de estos materiales con un material absorbente tradicional.

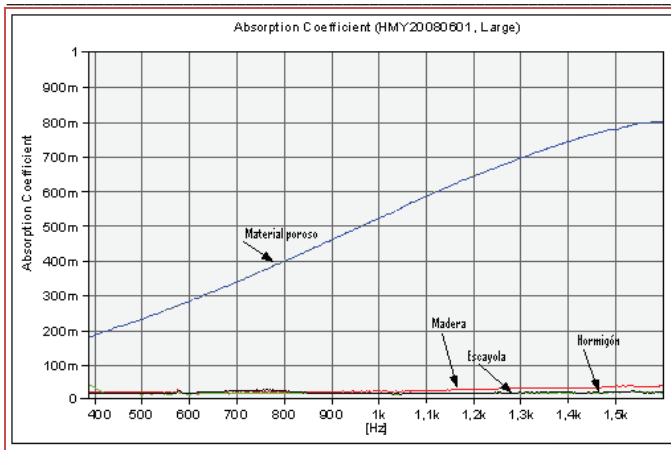


Figura 1. Absorción acústica de diferentes materiales en volumen.

En segundo lugar, no fue sencillo obtener una buena medida representativa en estos materiales. La preparación de las muestras debe ser cuidadosa para evitar las posibles fugas acústicas, debido al comportamiento del sonido, similar al agua, filtrándose por las posibles grietas o porosidades. Este hecho, al contrario de ser un problema, es lo que motivó a indagar en esta línea de investigación. Si el sonido tiende a introducirse en las grietas y cavidades, ¿por qué no construir cavidades para seleccionar el sonido que queremos atrapar? En paralelo al trabajo experimental hemos desarrollado un modelo teórico de simulación, utilizando el método matricial, que nos ha permitido comprender las medidas experimentales, de las cuales, a continuación resumimos.

Modelo teórico. Método matricial

La propagación acústica a lo largo de conductos se puede aproximar mediante ondas planas, cuando la sección de los tubos es suficientemente pequeña (Huertas y otros, 2007). Cada sección del tubo supondremos que es un medio distinto, con una impedancia acústica inversamente proporcional a la sección del mismo. En general, podemos suponer una configuración como la mostrada en la figura 2, compuesta por n secciones diferenciadas.

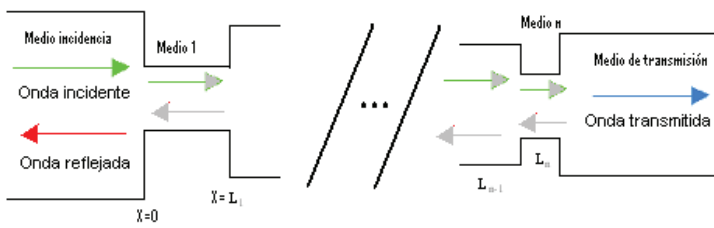


Figura 2. Esquema de la propagación acústica en las distintas secciones.

En cada sección del tubo tendremos una onda plana que viaja hacia la derecha y otra que viaja hacia la izquierda. En el medio de incidencia, o medio 0, la onda acústica está compuesta por la onda incidente y la onda reflejada, cuya presión acústica podemos escribir como se indica en la ecuación (1), donde hemos supuesto propagación en la dirección x , ω es la frecuencia angular de la onda, k_0 es el número de onda en este medio y P_i y P_r son la amplitud de la onda incidente y reflejada respectivamente:

$$p_0 = P_i e^{i(\omega t - k_0 x)} + P_r e^{i(\omega t + k_0 x)} \quad (1)$$

Para cualquier tramo intermedio, denominado j , la onda acústica se puede expresar como se indicada en la ecuación (2), donde $k_j = \omega/c_j$ representa el número de ondas en este medio, y P_j y P_{-j} las amplitudes de la onda que viajan a la derecha e izquierda respectivamente:

$$p_j = P_j e^{i(\omega t - k_j x)} + P_{-j} e^{i(\omega t + k_j x)} \quad (2)$$

Por otro lado, en el último medio, la onda transmitida sólo tiene una componente de la forma indicada en la ecuación (3), que representa la onda transmitida después de atravesar toda la estructura.

$$p_t = P_t e^{i(\omega t - k_t x)} \quad (3)$$

En todas las intercaras imponemos las siguientes condiciones de frontera:

- i) La presión acústica a ambos lados de la intercara debe ser la misma.
- ii) El caudal de fluido, $Q = S.u$ debe ser el mismo. Donde S es la sección del tubo y u es la velocidad del fluido en este tramo.

En la primera intercara, $x = 0$, obtenemos la relación matricial (4), donde $Z_1 = \rho_0.c_1/S_1$ es la impedancia acústica del tramo con sección S_1

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{Z_0} \\ \frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{Z_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_i \\ P_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} \\ \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_{-1} \end{pmatrix} \quad (4)$$

En cualquier intercara intermedia, j , en la posición $x_j = L_1 + L_2 + \dots + L_j$, obtenemos la relación (5)

$$\begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_j x_j}}{Z_j} & -\frac{e^{ik_j x_j}}{Z_j} \\ \frac{e^{-ik_j x_j}}{Z_j} & -\frac{e^{ik_j x_j}}{Z_j} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_j \\ P_{-j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_{j+1} x_j}}{Z_{j+1}} & -\frac{e^{ik_{j+1} x_j}}{Z_{j+1}} \\ \frac{e^{-ik_{j+1} x_j}}{Z_{j+1}} & -\frac{e^{ik_{j+1} x_j}}{Z_{j+1}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{j+1} \\ P_{-(j+1)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Mientras que en la última intercara, en la posición $x_n = L_1 + L_2 + \dots + L_i + \dots + L_n$ nos queda la ecuación (6)

$$\begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_n x_n}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_n}}{Z_n} \\ \frac{e^{-ik_n x_n}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_n}}{Z_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_n \\ P_{-n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_t x_n}}{Z_t} \\ \frac{e^{-ik_t x_n}}{Z_t} \end{pmatrix} P_t \quad (6)$$

Si agrupamos las ecuaciones (4), (5) y (6) para eliminar las amplitudes de las ondas correspondientes a los tramos intermedios, podemos obtener una relación matricial entre las magnitudes del medio de incidencia y de transmisión, ecuación (7):

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{Z_0} \\ \frac{1}{Z_0} & -\frac{1}{Z_0} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} \\ \frac{1}{Z_1} & -\frac{1}{Z_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_1 x_1}}{Z_1} & -\frac{e^{ik_1 x_1}}{Z_1} \\ \frac{e^{-ik_1 x_1}}{Z_1} & -\frac{e^{ik_1 x_1}}{Z_1} \end{pmatrix}^{-1} \cdot \\ \cdot \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_2 x_1}}{Z_2} & -\frac{e^{ik_2 x_1}}{Z_2} \\ \frac{e^{-ik_2 x_1}}{Z_2} & -\frac{e^{ik_2 x_1}}{Z_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_2 x_2}}{Z_2} & -\frac{e^{ik_2 x_2}}{Z_2} \\ \frac{e^{-ik_2 x_2}}{Z_2} & -\frac{e^{ik_2 x_2}}{Z_2} \end{pmatrix}^{-1} \dots \dots \\ \dots \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_n x_{n-1}}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_{n-1}}}{Z_n} \\ \frac{e^{-ik_n x_{n-1}}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_{n-1}}}{Z_n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_n x_n}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_n}}{Z_n} \\ \frac{e^{-ik_n x_n}}{Z_n} & -\frac{e^{ik_n x_n}}{Z_n} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \frac{e^{-ik_t x_n}}{Z_t} \\ \frac{e^{-ik_t x_n}}{Z_t} \end{pmatrix} P_t \quad (7)$$

Las matrices con exponenciales, se pueden combinar dos a dos, para dar lugar a la relación matricial (8), cuya dependencia explícita se escribe en forma de funciones trigonométricas.

$$\begin{pmatrix} P_i \\ P_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{Z_0}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{Z_0}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos k_1 L_1 & iZ_1 \operatorname{sen} k_1 L_1 \\ \frac{i \operatorname{sen} k_1 L_1}{Z_1} & \cos k_1 L_1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots \begin{pmatrix} \cos k_n L_n & iZ_n \operatorname{sen} k_n L_n \\ \frac{i \operatorname{sen} k_n L_n}{Z_n} & \cos k_n L_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-ik_i x_n} \\ e^{-ik_i x_n} \\ \frac{1}{Z_t} \end{pmatrix} P_t \quad (8)$$

Observamos que cada medio viene definido por una matriz característica, donde aparece la impedancia acústica, Z_j , propia de cada tramo. Cada matriz característica nos relaciona las amplitudes de la onda acústica de un medio con las del medio contiguo. De esta forma, nos quedan relacionadas las amplitudes del medio de incidencia, con las amplitudes del medio de transmisión, por una simple relación matricial. Podemos obtener, de forma inmediata, el coeficiente de reflexión y transmisión de amplitud definidos como $R=P_r/P_i$ y $T=P_t/P_i$ respectivamente. El coeficiente de absorción, α , definido como el cociente de la energía no reflejada por la energía incidente, se puede calcular a partir del coeficiente de reflexión mediante la ecuación (9), donde r_r y r_i son la parte real e imaginaria del coeficiente de reflexión de amplitud.

$$\alpha = 1 - |R|^2 = 1 - r_r^2 - r_i^2 \quad (9)$$

Dispositivo experimental

La medición del coeficiente de absorción se ha realizado utilizando un tubo de medida de impedancias tipo 4206 de Brüel & Kjaer, con dos micrófonos 2670 B&K para dos tamaños de muestras de dimensiones máximas 100 x 200 mm y 29 x 200 mm, que cubren los rangos de frecuencia de 50 Hz a 1.6 kHz y de 500 Hz a 6.4 kHz respectivamente, figura 3, en la que también se aparecen algunas muestras utilizadas en la medida.



Figura 3. Dispositivo experimental. Consta de tubo de impedancias y sistema PULSE.

En la adquisición y tratamiento de la señal se ha utilizado el sistema PULSE con un amplificador tipo 2716 B&K para la determinación del coeficiente de reflexión a incidencia normal, cuya expresión es:

$$r = |r|e^{j\phi_r} = r_r + jr_i = \frac{H_{121} - H_I}{H_R - H_{12}} e^{2jk_0x_1} \quad (10)$$

Donde:

r_r la componente real del coeficiente de reflexión

r_i la componente imaginaria del coeficiente de reflexión

x_1 la distancia entre la muestra y la posición última del micrófono

ϕ_r el ángulo de fase del coeficiente de reflexión a incidencia normal

H_I y H_R son la función de transferencia para la onda incidente sola o reflejada, que vienen dadas por las expresiones:

$$H_I = \frac{p_{2I}}{p_{1I}} = e^{-jk_0(x_1-x_2)} = e^{-jk_0s} \quad H_R = \frac{p_{2R}}{p_{1R}} = e^{jk_0(x_1-x_2)} = e^{jk_0s} \quad (11)$$

Por otro lado, la determinación del coeficiente de absorción se realiza sustituyendo (11) en (10) para obtener un valor experimental de la ecuación (9).

Absorción y transmisión acústica.

En la tarea de reducir el ruido, nos encontramos un doble problema. Tan importante es absorber el ruido allá donde se produce, como evitar la

transmisión del mismo. Por otro lado, en el diseño de una vivienda bioclimática juega un papel importante la creación de corrientes de aire que comunican los distintos compartimentos entre sí, y con las distintas orientaciones de la fachada exterior (Martin y otros, 2010). Estas aberturas, en general, son excelentes vías de propagación del ruido que deterioran los parámetros de aislamiento acústico preestablecido en los cerramientos. Es por ello que, tanto en la generación, como en la propagación, es necesario diseñar trampas acústicas para la absorción activa del ruido. En la figura 4 mostramos dos ejemplos de cavidades que actúan como trampas en reflexión y en transmisión.

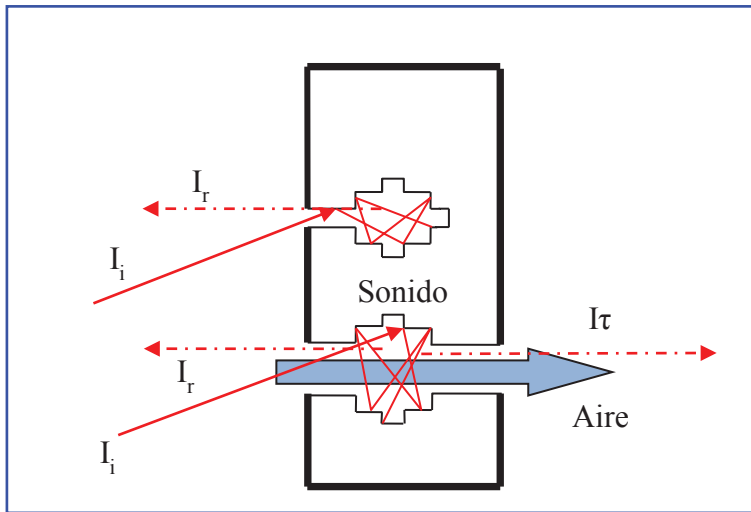


Figura 4. Esquema de funcionamiento de absorbentes basados en trampas acústicas por reflexión y transmisión.

En la figura 5a, se muestra los espectros de transmisión experimentales, en función de la frecuencia, para distintas cavidades. En la figura 5b, mostramos la simulación teórica para valores de la velocidad real e imaginaria del sonido utilizados en el ajuste del espectro al valor experimental obtenido.

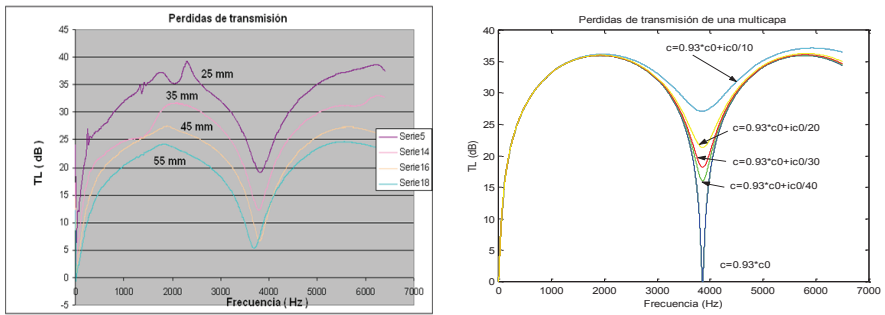


Figura 5. a) Pérdidas de transmisión obtenidas para distintos diámetros de la cavidad, a longitud constante de 41 mm. b) Pérdidas en transmisión simuladas.

Se puede observar la eliminación, casi al 100%, la transmisión del ruido en una banda centrada en una frecuencia previamente diseñada. En este caso, alrededor de los 4000 Hz.

De forma similar, en la figura 6, se muestra el resultado experimental y simulado en la absorción por reflexión, en una cavidad cilíndrica, para incidencia normal. La absorción se encuentra en una banda centrada alrededor de 1100 Hz.

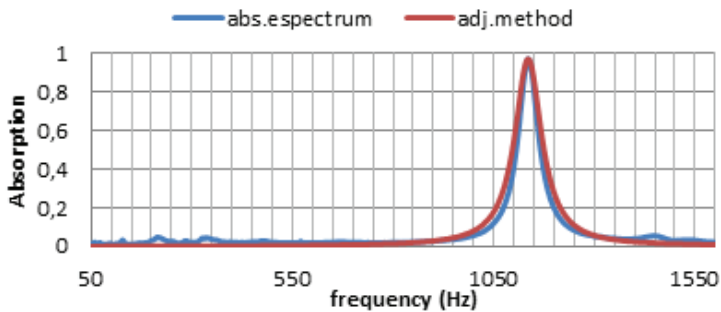


Figura 6. Espectro de absorción experimental y simulado de una cavidad cilíndrica.

Los espectros de absorción obtenidos, indican la eliminación de una banda centrada en la frecuencia determinada. El trabajo realizado en la EPC se concentra en estudiar el comportamiento de las distintas cavidades simples realizadas en yeso, (Huertas y otros, 2007), en madera de pino de Cuenca (Huertas y otros, 2008) o en estructuras complejas (Huertas y otros, 2008b) y (Escobar y otros, 2009).

A continuación, resumimos los resultados obtenidos para algunas estructuras básicas, en las que hemos tomado como parámetro de estudio la variación del diámetro y la profundidad de la cavidad:

Estructuras tipo 1. En primer lugar, estudiamos la influencia del número de agujeros perforados en el coeficiente de absorción acústica. En la figura 7a se muestra los espectros de absorción realizados en un cilindro de yeso de 65 mm de longitud y 27 mm de diámetro, en la que hemos realizado 8 perforaciones de 2 mm de diámetro y aproximadamente 19 mm de profundidad. En la figura 7b, se muestra la simulación para este tipo de estructuras.

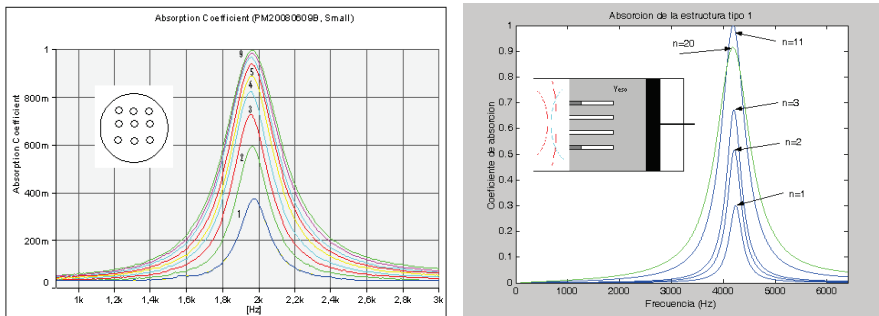


Figura 7. a) Espectro de absorción acústica, obtenido en la estructura tipo 1. b) Espectro simulado en una muestra similar.

La principal conclusión es que el valor de la absorción, a una frecuencia determinada, aumenta proporcionalmente al número de agujeros practicados, apareciendo una saturación en la absorción, a partir de este valor no se consigue aumentar la misma incrementando el número de trampas acústicas.

Estructuras tipo 2. En segundo lugar, obtenemos el espectro de absorción para estructuras, en las que las cavidades son de profundidad diferente, manteniendo el diámetro constante. En la figura 8 mostramos, como ejemplo, la posición de los picos de absorción para una estructura con cuatro cavidades perforadas del mismo diámetro y distinta profundidad.

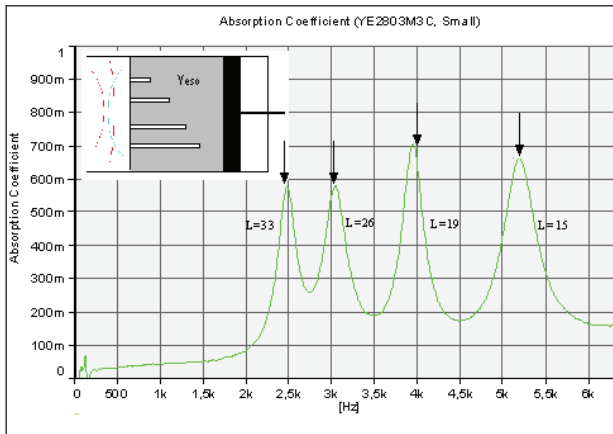


Figura 8. Coeficiente de absorción acústica para una estructura tipo 2.

Se pueden observar cuatro picos de absorción acústica independientes y bien diferenciados, que corresponden a cada una de las perforaciones realizadas. En la gráfica hemos mostrado la profundidad de las cavidades. También se indica, mediante flechas, la posición de la frecuencia central obtenida teóricamente, mediante la simulación por el método matricial, con los valores nominales.

Estructuras tipo 3. En este caso, hemos estudiado la dependencia de la absorción cambiando el diámetro de la cavidad, y manteniendo la profundidad constante. En la figura 9 se muestra el espectro de absorción obtenido en una muestra con cinco cavidades de diferente diámetro.

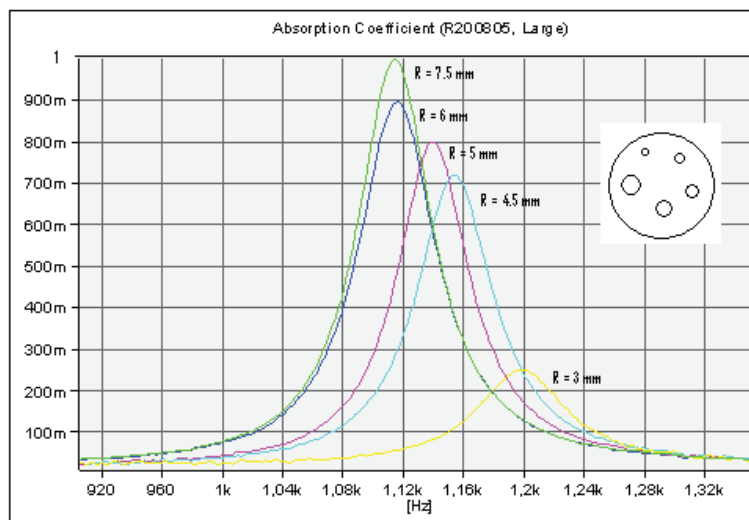


Figura 9. Espectros de absorción acústica para perforaciones cilíndricas con distinto diámetro

En el estudio de este tipo de muestras, llegamos a dos conclusiones importantes. La primera es que obtenemos un incremento en la intensidad acústica absorbida al aumentar el diámetro de los agujeros, obteniendo la saturación en la absorción para un diámetro determinado, en un comportamiento similar a las muestras de tipo 1. Como segunda conclusión, podemos apreciar un desplazamiento en frecuencia de los picos de absorción, debido a la corrección de la longitud efectiva de las cavidades que depende del diámetro las mismas.

La realización sistemática de estos estudios se ha realizado, en gran medida, durante el desarrollo del proyecto "Diseño y caracterización de absorbentes acústicos basados en estructuras geométricas" financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y realizado en madera de pino de Cuenca en el periodo comprendido entre los años 2009 y 2011.

Estructuras tipo 4. Para conseguir obtener absorción acústica a bajas frecuencias, mediante la perforación de cavidades simples, tenemos que trabajar con valores para la longitud demasiado grandes, que en la práctica resultan poco viables, por lo tanto, ha sido necesario realizar el estudio de otro tipo de cavidades más complejas, fruto de la asociación en serie y paralelo de las cavidades simples, estudiadas con anterioridad. En la figura 10, se resume la posición de los picos de absorción obtenidos para diferentes configuraciones y se incluye un esquema de las estructuras estudiadas, junto a los resultados obtenidos de la simulación teórica mediante dos métodos alternativos: el método matricial, descrito con anterioridad, y un segundo método de asociación serie/paralelo de osciladores mecánicos.

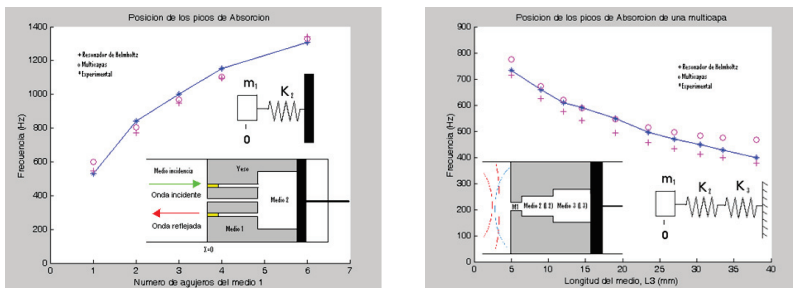


Figura 10. Posición de los picos de absorción experimentales y simulados por los modelos matricial y resonador para cavidades a) paralelo y b) en serie.

Estructuras tipo 5. Además de las cavidades con simetría cilíndrica, hemos practicado cavidades con forma paralelepédica. En los espectros mostrados en la figura 11a se muestra el comportamiento de la absorción para una muestra con diferentes áreas practicadas, para una misma profundidad. Por otro lado, en la figura 11b, se muestran los espectros de absorción obtenidos en diferentes cavidades, de la misma área rectangular y profundidad, con diferente grado de anisotropía de la superficie de la ranura.

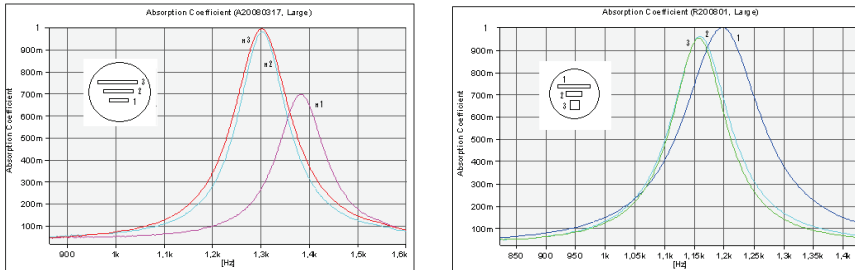


Figura 11. Coeficiente de absorción acústica obtenido para perforaciones paralelepédicas de igual profundidad a) diferente área b) idéntica área.

En el primer caso predomina el efecto de la superficie y longitud efectiva de la cavidad, en la posición e intensidad de los picos de absorción, mientras que en el segundo caso, hemos podido discriminar la influencia de la anisotropía de las cavidades frente al resto de parámetros.

Resumen y momento actual

El trabajo realizado, hasta el momento, nos permite estar en disposición de diseñar y construir absorbentes acústicos en cualquier material de construcción con el simple uso de cavidades geométricas. En la figura 12 se presentan algunos ejemplos de absorbentes para diferentes rangos de frecuencia con diversas geometrías. Como puede observarse, en baja frecuencia, no es suficiente con cavidades simples, y tenemos que recurrir a cavidades del tipo 4, como se ha indicado previamente.

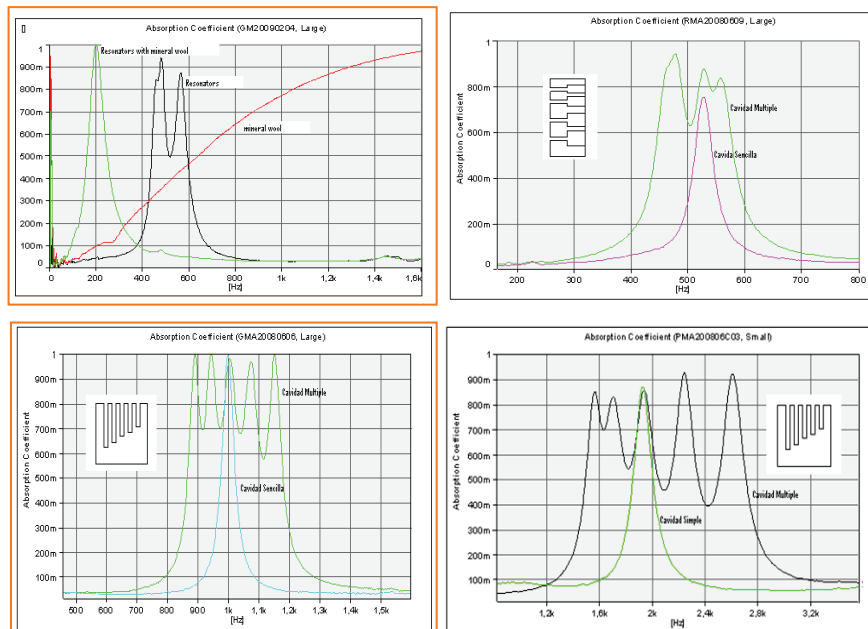


Figura 12. Espectros de absorción de absorbentes diseñados en diferentes rangos de frecuencia.

Por otro lado, estamos profundizando el estudio de los mecanismos de absorción en estas geometrías, variando la rugosidad superficial en el interior de las cavidades (Martin y otros, 2013) dentro del desarrollo del proyecto de investigación, financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha, que lleva por título: "Optimización del diseño y caracterización de la absorción acústica basada en estructuras geométricas", con financiación en el periodo comprendido entre los años 2014 a 2016.

Agradecimientos

Junto a los profesores del departamento de Física Aplicada, la realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la contribución de los profesores adcritos a otros departamentos de la Escuela Politecnica de Cuenca: Samuel Quintana, Isabel González, Miguel Ángel Ruiz y Juan Vicente Visier.

Por último, la puesta en marcha y realización de esta línea de investigación ha sido posible gracias a la financiación de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha y la aportación de fondos de desarrollo regional, FEDER, de la Unión Europea.

Bibliografía

Huertas, P. y Quintana, S. (2005) Informe técnico del proyecto 'Caracterización acústica de hormigones para radioterapia mediante el tubo de impedancias'. Referencia UCTR050207. UCLM.

Huertas, P. y otros. (2007) 'Simulación y medida del coeficiente de absorción acústica para incidencia normal en estructuras de yeso perforado'. I jornada nacional de investigación en la edificación. ISBN: 978-84-690-5660-8. Mayo 2007, Madrid.

Huertas, P. y otros. (2008) 'Diseño y caracterización de absorbedores acústicos en geometrías realizadas en madera de pino de Cuenca. Libro de actas II jornada nacional de investigación en la edificación. Madrid. Julio 2008.

Huertas, P. y otros. (2008b) 'Diseño y medida del coeficiente de absorción acústica en estructuras complejas realizadas en materiales de construcción. II jornada de investigación en la construcción. ISBN: 978-84-7292-367-6. Mayo 2008, Madrid.

Escobar, I. y otros (2009) 'Increase the acoustic absorption coefficient in building materials with complex geometric structures'. I congreso internacional de investigación en la edificación. Junio 2009, Madrid.

Martin, J. y otros (2010) 'Diseño y caracterización de filtros acústicos para viviendas bioclimáticas'. II congreso nacional de investigación en la edificación. Diciembre 2010, Madrid.

Martin, J. y otros (2013) 'Study of sound absorption in cavities with different surface roughness practiced in building materials'. Septiembre 2013, Innsbruck. Austria.