

ABSORCIÓN ACÚSTICA DE HORMIGÓN PERFORADO

PACS:

Jesús Carbajo¹; Tomás Vicente Esquerdo²; Antonio Vicente Nadal-Gisbert³; Jaime Ramis¹; Francisco D. Denia⁴.

¹ Departamento de Física, Universidad de Alicante
Carretera San Vicente del Raspeig, 03080, San Vicente del Raspeig, España
{jesus.carbajo@ua.es, jramis@ua.es}

² Instituto de Diseño para la Fabricación y Producción Automatizada, Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{toesllo1@mcm.upv.es}

³ Instituto de Tecnología de Materiales, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{anadal@mcm.upv.es}

⁴ Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
{fdenia@mcm.upv.es}

ABSTRACT

Perforated concrete shows a high potential in architectural construction elements whose design is desired to be aesthetic for decoration and to provide good brightness for indoor applications without losing structural strength. This paper deals with manufacturing and characterization of acoustic and non-acoustic properties of various small-scale samples of perforated concrete. Non-perforated specimen data is used along with a homogenization technique based model to describe the sound propagation in the proposed materials, made up of two interconnected porous networks with different characteristic size. The model is validated by comparing the predictions for the sound absorption coefficient with the experimental results.

RESUMEN

El hormigón perforado presenta un elevado potencial arquitectónico en elementos de construcción con cuyo diseño se desea conseguir una decoración estética y buena luminosidad para interiores sin perder robustez estructural. Este trabajo presenta la fabricación y caracterización de las propiedades acústicas y no acústicas de distintas muestras a pequeña escala de hormigón perforado. A partir de la información obtenida en especímenes sin perforar y aplicando un modelo basado en técnicas de homogeneización, es posible describir la propagación sonora en los materiales propuestos, en los que se interconectan redes porosas de diferente tamaño característico. El modelo se ha validado comparando sus predicciones para el coeficiente de absorción con resultados experimentales.

1. INTRODUCCIÓN

La mejora de las prestaciones acústicas de los elementos constructivos resulta de gran interés en el sector de la edificación [1]. Los materiales porosos, tales como fibras y espumas, se emplean comúnmente para reducir la transmisión de ruido aéreo y estructural en un gran número de soluciones en este ámbito. Sin embargo, estos materiales presentan una baja resistencia estructural y durabilidad, especialmente cuando están expuestos a agentes medioambientales (lluvia, nieve, viento,...), mostrando una notable disminución de su rendimiento acústico con el paso del tiempo. Alternativamente, es habitual recurrir a elementos elaborados íntegramente a partir de hormigón, cuya elevada rigidez y robustez estructural evita la necesidad de emplear marcos o soportes adicionales. Asimismo, al ser un material inherentemente poroso, resulta viable trabajar con distintos tamaños de poro para conseguir una aceptable absorción acústica, adaptándose en cada caso a las restricciones estructurales de diseño. Los principales inconvenientes de este tipo de soluciones son su elevado peso y la dificultad para controlar el proceso de consolidación que condiciona el rendimiento acústico de la mezcla granular final. El uso de perforaciones en el hormigón no solo presenta las ventajas anteriormente citadas, sino que además permite reducir su peso final y por tanto el coste asociado al mismo.

Los paneles perforados son absorbentes sonoros comúnmente utilizados en aplicaciones de control de ruido, produciéndose el fenómeno de absorción acústica por las pérdidas viscosas en sus poros u orificios. Existen un gran número de trabajos [2-5] que modelan la impedancia acústica de estos dispositivos, pudiendo determinarse su comportamiento acústico a partir del diámetro de dichos orificios, la tasa de perforación o porosidad y el espesor del panel. Aunque algunos autores han estudiado configuraciones más complejas [6-9], la mayoría consisten típicamente en una superficie rígida plana con orificios distribuidos periódicamente a lo largo de la misma. Sin embargo, cuando la parte no perforada del panel es a su vez un material poroso cuyo tamaño de poro es menor que el de las perforaciones (como es el caso del hormigón poroso), también deben tenerse en cuenta los mecanismos de pérdidas asociados al primero. Existen en la literatura varios modelos [10-13] que permiten modelar acústicamente medios granulares como puede ser el caso del hormigón poroso. Al material resultante de perforar un medio poroso se le conoce como material meso-perforado o de doble porosidad, dado que se compone de dos redes porosas de diferente tamaño característico. Olny y Boutin [14], basándose en un trabajo previo en el campo de la geofísica [15] que utilizaba un método de homogeneización, propusieron un modelo genérico para describir la propagación sonora en este tipo de materiales. Posteriormente, varios autores [16-19] han aplicado esta teoría al estudio de la absorción sonora de distintos materiales porosos, verificando experimentalmente que su coeficiente de absorción sonora puede estimarse satisfactoriamente con dicho modelo.

El hormigón perforado suele consistir en un panel fabricado a partir de un compuesto de mortero y árido grueso, sobre el que se realizan una serie de orificios o perforaciones. El efecto decorativo y estético que puede ofrecer un panel de este tipo, junto con los efectos de luces y sombras, resulta atractivo para arquitectos y constituye una opción interesante para múltiples aplicaciones y entornos (patios interiores, zonas de recreo,...). Si bien la trabajabilidad de los mismos no es muy buena (suelen emplearse moldes o matrices), en los últimos años se han desarrollado nuevos métodos de fabricación que recurren a sofisticadas técnicas digitales, facilitando enormemente esta labor [20, 21]. Estas últimas permiten producir paneles cuyo patrón presente distintas distribuciones o formas de orificio, consiguiendo perspectivas que favorecen la presencia visual del panel e invitan a plantear su diseño con fines acústicos.

Este trabajo presenta los resultados preliminares correspondientes a la absorción acústica de hormigón perforado. Para ello se han caracterizado las propiedades acústicas y no acústicas de distintas muestras a pequeña escala elaboradas a partir de arlita, un agregado ligero sostenible de reducido peso que además presenta una buena capacidad absorbente. A partir de la información obtenida en especímenes sin perforar y aplicando el modelo propuesto por Olny y Boutin [14], se ha estimado el coeficiente de absorción acústica de las muestras perforadas. Las predicciones se han comparado con los resultados experimentales obtenidos a partir de medidas en tubo de onda plana, obteniendo una buena correlación entre ambos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Modelado acústico de materiales porosos

La propagación acústica en un medio poroso saturado con aire es difícil de estudiar a escala microscópica debido a la compleja geometría de su estructura. En su lugar, es común describir el comportamiento de las ondas acústicas a través del mismo adoptando una formulación macroscópica y considerando su esqueleto rígido para así modelarlo como un fluido equivalente. Este enfoque simplificado permite derivar expresiones complejas dependientes de la frecuencia para sus propiedades acústicas más relevantes, impedancia característica Z_c y número de onda k

$$Z_c = \sqrt{\rho K} \quad (1)$$

$$k = \omega \sqrt{\rho/K} \quad (2)$$

donde ω es la frecuencia angular, ρ y K la densidad dinámica y el módulo de compresibilidad del fluido equivalente, respectivamente. Estas propiedades representan la fricción viscosa y los mecanismos de pérdidas térmicas en las paredes de los poros, estando relacionadas con el tamaño y proporción de éstos en el material.

Así, la impedancia de superficie Z_s y el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal α de un material poroso de espesor d colocado sobre una pared rígida pueden calcularse utilizando las siguientes expresiones

$$Z_s = -jZ_c \cot(kd) \quad (3)$$

$$\alpha = 1 - \left| \frac{Z_s - \rho_0 c_0}{Z_s + \rho_0 c_0} \right|^2 \quad (4)$$

siendo ρ_0 y c_0 la densidad del aire y la velocidad de propagación del sonido en éste, respectivamente.

2.2 Materiales granulares

Horoshenkov y Swift [13] propusieron unas expresiones de la densidad dinámica y el módulo de compresibilidad para medios granulares con una distribución estadística de tamaño de poro cercana a log-normal (habitual en este tipo de materiales). Dicho modelo ha sido utilizado con éxito anteriormente para analizar muestras de hormigón [22-24], motivando la elección del mismo en este trabajo para predecir las propiedades acústicas del material poroso granular base elaborado a partir de arlita. Estas ecuaciones pueden escribirse de la siguiente forma

$$\rho = \frac{\alpha_\infty}{\phi} \left(\rho_0 - j \frac{\sigma \phi}{\omega \alpha_\infty} \tilde{F}(\omega) \right) \quad (5)$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\phi} \left(\gamma - \frac{\rho_0 (\gamma - 1)}{\rho_0 - j \frac{\sigma \phi}{\omega \alpha_\infty N_p} \tilde{F}(N_p \omega)} \right)^{-1} \quad (6)$$

donde α_∞ es la tortuosidad, ϕ es la porosidad, σ es la resistividad al flujo, γ la relación de calores específicos, P_0 la presión atmosférica y N_p el número de Prandtl. $\tilde{F}(\omega)$ es la función de corrección de la viscosidad, que puede expresarse de forma aproximada como

$$\tilde{F}(\omega) \cong \frac{1 + a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2}{1 + b_1 \varepsilon} \quad (7)$$

siendo $\varepsilon = \sqrt{j\omega\rho_0\alpha_\infty/(\sigma\phi)}$ un parámetro adimensional, $a_1 = \theta_1/\theta_2$, $a_2 = \theta_1$ y $b_1 = a_1$, donde θ_1 y θ_2 son los factores de forma, que se definen en función del tipo de geometría de poro asumida, siendo para el caso circular $\theta_1 = (4/3)e^{4\xi} - 1$ y $\theta_2 = (1/\sqrt{2})e^{3\xi/2}$, con $\xi = (\sigma_p \ln 2)^2$, siendo σ_p la desviación estándar de la distribución log-normal del tamaño de poro.

2.3 Materiales de doble porosidad

Considérese un material meso-perforado o de doble porosidad saturado con aire como el de la Figura 1, compuesto por dos redes porosas periódicas interconectadas cuyos tamaños característicos l_M y l_m difieren (en lo que sigue, los subíndices M y m hacen referencia a los mesoporos y microporos, respectivamente), siendo ambos mucho menores que la longitud de onda de trabajo

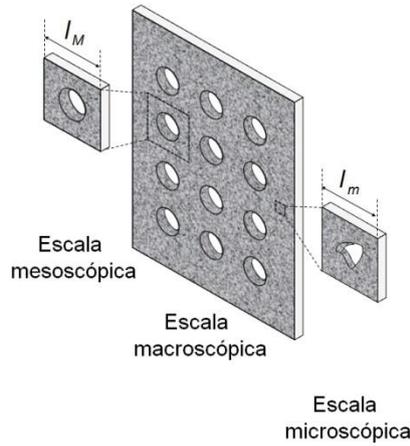


Figura 1 – Escalas de un material meso-perforado o de doble porosidad.

Olny y Boutin [14] propusieron un modelo macroscópico genérico basado en técnicas de homogenización que permite determinar la densidad dinámica ρ_{dp} y el módulo de compresibilidad K_{dp} de este tipo de medios. Dicha aproximación desprecia el movimiento de las partes sólidas del material (esqueleto rígido), asumiéndose además para el caso en estudio perforaciones de sección transversal circular y un bajo contraste entre escalas porosas (es decir, $l_m/l_M \approx 10^{-1}$, con lo que existe una fuerte interacción entre ambas redes porosas). Las expresiones de dichas propiedades para el material de doble porosidad vienen dadas entonces por

$$\rho_{dp} = \left(\frac{1 - \phi_M}{\rho_m} + \frac{1}{\rho_M} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$K_{dp} = \left(\frac{1}{K_M} + \frac{1 - \phi_M}{K_m} \right)^{-1} \quad (9)$$

Así, para un material de doble porosidad como el que se pretende analizar, las propiedades del medio microporoso, ρ_m y K_m , pueden calcularse utilizando las ecuaciones (5) y (6) del modelo de Horoshenkov y Swift [13] descrito anteriormente; mientras que en los mesoporos

puede usarse el modelo simplificado de Zwicker y Kosten [10] para el caso de perforaciones cilíndricas circulares de radio R , definiéndose la densidad dinámica ρ_M y el módulo de compresibilidad K_M del aire en el interior de las mismas según

$$\rho = \frac{\rho_0}{F(\omega)} \quad (10)$$

$$K = \frac{\gamma P_0}{\gamma - (\gamma - 1) F(N_p \omega)} \quad (11)$$

donde $F(\omega)$ se obtiene como

$$F(\omega) = 1 - \frac{2J_1(s\sqrt{-j})}{s\sqrt{-j}J_0(s\sqrt{-j})} \quad (12)$$

siendo $s = \sqrt{\omega \rho_0 R^2 / \eta}$, J_0 y J_1 son funciones de Bessel cilíndricas de orden 0 y 1, respectivamente, y η es la viscosidad dinámica del aire.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Preparación de las muestras

En este trabajo se han estudiado distintas muestras a pequeña escala de hormigón sin perforar y perforado elaboradas a partir de agregados ligeros de arlita que difieren en términos de tamaño (en el rango de 2 a 8 mm) y forma (tipos A y B) del grano, así como en la densidad final (materiales 1-3). La arlita es un tipo de arcilla expandida aislante de origen cerámico, con una estructura altamente porosa, una excelente relación resistencia-peso, y unas propiedades termoacústicas que la hacen idónea para su uso en hormigones ligeros. Además, su carácter sostenible (puede reciclarse y no genera residuos peligrosos para el medio ambiente) hace que sea una interesante alternativa a otras soluciones comúnmente utilizadas. Las mezclas granulares se obtuvieron siguiendo el procedimiento descrito en [24]. En resumen, se mezcla el grano virgen de arlita con un mortero de cemento y agua durante 10-15 minutos y se disponen en moldes circulares de silicona de 72 mm de diámetro y 50 mm de espesor durante 48 horas antes de extraerlas para completar el proceso de curado en un periodo de 30 días a 23 °C y una humedad relativa del 34 %. Los especímenes perforados se obtuvieron empleando dos técnicas de perforación: manual y moldeado. Se utilizó una taladradora sobre la muestra ya curada en el primer caso y unos moldes cilíndricos de metal (suplementarios a los de silicona) con antiadherente en el segundo. A algunas de las probetas resultantes se les realizaron perforaciones de entre 4 y 30 mm. La información referente a la preparación de las muestras se recoge en la Tabla 1. La Figura 2 presenta fotografías de algunas de las muestras analizadas.

Tabla 1 – Datos de preparación de las muestras de material granular.

Mezcla granular	Tipo	Tamaño de grano (mm)	A/C/G (%)	Densidad (kg/m ³)
Material 1	A	≤ 4	17/33/50	650
Material 2	A	> 4	17/33/50	700
Material 3	B	≥ 4	17/33/50	490

* A/C/G indica las proporciones de Agua, Cemento y material Granular de cada mezcla, respectivamente.

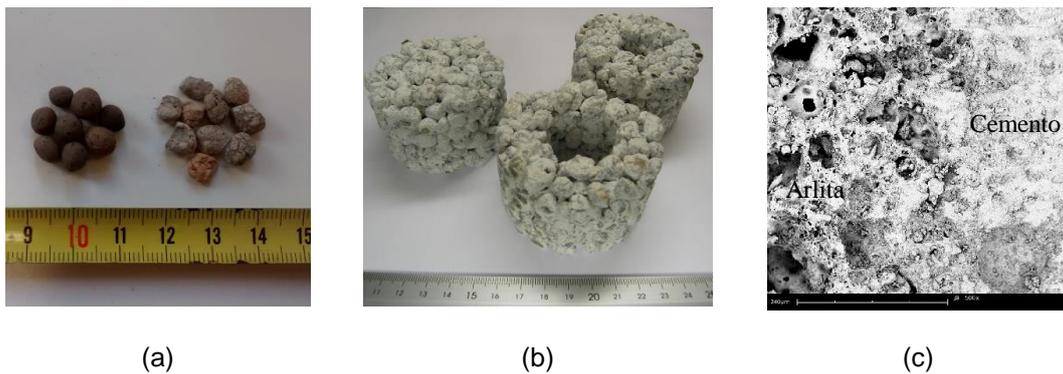


Figura 2 – Imágenes de hormigón elaborado a partir de arlita: (a) detalle de los dos tipos de granos virgen empleados (derecha: tipo A, izquierda: tipo B), (b) muestras sin perforar y perforadas preparadas para medidas en tubo de onda plana y (c) fotografía utilizando microscopio electrónico.

3.2 Caracterización de los materiales

En primer lugar se ha medido el coeficiente de absorción a incidencia normal de todas las muestras (no perforadas y perforadas) siguiendo el procedimiento descrito en la normativa ISO 10534-2:1998 [25]. El modelo teórico descrito en la Sección 2.2 se basa en cuatro propiedades físicas medibles (porosidad, tortuosidad, resistividad al flujo y desviación estándar de tamaño de poro) que se han determinado experimentalmente para las muestras granulares sin perforar. Así, a partir de estos valores, empleando la técnica de homogeneización del modelo de Olny y Boutin [14] es posible estimar las propiedades acústicas de los especímenes perforados y validar así la aplicabilidad de la misma a este tipo de materiales.

La porosidad abierta se ha medido usando una variante del método de Vasina et al. [26] en la que, en lugar de pesar las muestras antes y después de sumergirlas en agua, se miden directamente los volúmenes de la muestra y de agua desalojada (este último con un matraz). La tortuosidad se ha deducido utilizando un algoritmo de optimización basado en el método de búsqueda directa de Nelder-Mead [27]. Dicho método inverso ajusta las predicciones obtenidas para el coeficiente de absorción con el modelo de Horoshenkov y Swift [13] a los resultados obtenidos experimentalmente. Se ha escogido esta opción dadas las características pseudo-destructivas inherentes a los métodos químicos comúnmente adoptados para determinar ésta y que requieren del uso de un electrolito, aunque también existen otros métodos por ultrasonidos [28]. La resistividad al flujo se obtuvo empleando el método indirecto basado en medidas acústicas en tubo de onda plana propuesto por Ingard y Dear [29]. Ambos métodos de tubo de onda plana, el de la normativa ISO 10534-2:1998 y el recién mencionado, se llevaron a cabo con un equipo de medida y un tubo preparado al efecto cuyos detalles constructivos pueden consultarse en [24]. Por último, la desviación estándar de tamaño de poro se determinó ajustando teóricamente la distribución acumulativa de dicho tamaño obtenida experimentalmente utilizando el método de extracción de agua [30] a la integral de una distribución estadística de tipo log-normal [13], excepto para el material 3, para el que se determinó utilizando el mismo procedimiento inverso con el que se obtuvo la tortuosidad.

4. RESULTADOS

4.1 Propiedades físicas

La Tabla 2 resume las propiedades no acústicas de algunas de las muestras granulares sin perforar bajo estudio. La predicción de las propiedades acústicas, tanto de las muestras no perforadas como de las perforadas, se llevó a cabo utilizando los valores de esta tabla como datos de entrada en los modelos teóricos de la Sección 2.

Tabla 2 – Propiedades físicas medidas de las muestras granulares.

Mezcla granular	Porosidad, ϕ	Tortuosidad, α_{∞}	Res. flujo (Nsm^{-4}), σ	Desv. estándar, σ_p
Material 1	0.39	1.82*	2176	0.21
Material 2	0.38	1.87*	1839	0.16
Material 3	0.35	1.56*	1507	0.24*

* Valores obtenidos con el método numérico inverso referido en la Sección 3.2.

Los resultados de porosidad indican que las muestras preparadas ofrecen valores similares entre el 35 y el 40% para esta propiedad. Los valores de tortuosidad, aunque obtenidos inversamente, parecen presentar también valores de orden similar entre materiales. Por otra parte, los resultados de resistividad al flujo evidencian que ésta es inversamente proporcional al tamaño de las partículas de grano de las muestras (aunque en esta comunicación no se ha incluido la información de tamizado, el material 3 presenta granulometrías mayores que los otros dos), dado que la atenuación de la propagación sonora aumenta al reducir el tamaño de grano. Esta afirmación no es cierta para valores de resistividad excesivamente elevados, ya que ello implicaría valores demasiado altos de la impedancia característica y por tanto un peor acoplamiento de las impedancias aire-mezcla granular, produciendo una menor absorción sonora. Teniendo esto en cuenta, los tamaños de granos menores presentan unos valores de resistividad al flujo más elevados para los casos examinados. En cuanto a la desviación estándar de tamaño de poro, los valores ajustados se encuentran en el rango 0.16-0.24, siendo las muestras con granulometrías menores las que exhiben poros más pequeños.

4.2 Propiedades acústicas

El rendimiento acústico de los materiales granulares depende mayormente de su porosidad, del tamaño de los poros y de la distribución de éstos a lo largo del mismo. En el caso de los materiales perforados, hay que añadir el tamaño de las perforaciones. Aunque se entiende que en la práctica el hormigón perforado se emplea como un elemento autónomo, sin pared rígida detrás, se evaluará su absorción sonora para estas condiciones por simplicidad. Es propósito de los autores analizar otros parámetros que podrían resultar más fieles a situaciones reales, como las pérdidas por transmisión, aunque el parámetro escogido sirve también para validar la aplicabilidad de los modelos teóricos anteriores a este tipo de materiales. La Figura 3 muestra el coeficiente de absorción medido para algunas de las mezclas granulares no perforadas.

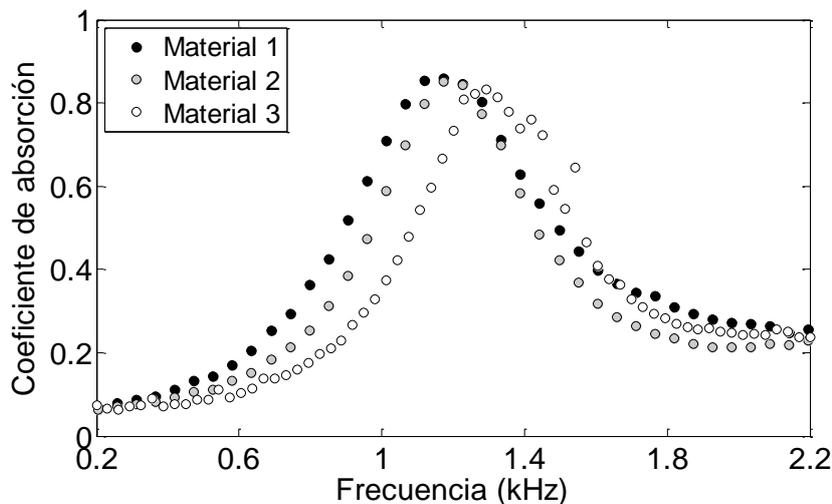


Figura 3 – Coeficiente de absorción sonora medido para diferentes muestras granulares.

Los experimentos en tubo de onda plana sugieren que la mezcla con menor tamaño de grano muestra una absorción sonora y un ancho de banda relativamente mayores. Por otra parte, el desplazamiento de la frecuencia de pico hacia bajas frecuencias puede derivarse también de un valor más alto de la resistividad al flujo, asociado a una mayor atenuación de las ondas acústicas en el material granular.

Para el caso de un material meso-perforado o de doble porosidad, y asumiendo éste periódico, suele considerarse un elemento con una sola perforación como representativo del mismo (siempre que el orificio esté ubicado simétricamente respecto a los límites de dicho elemento). La Figura 4 muestra el coeficiente de absorción para los materiales 2 y 3 cuando sobre éstos se practican perforaciones de distintos tamaños. Cabe señalar que en el primer caso (material 2) las perforaciones se realizaron con una taladradora, mientras que en el segundo (material 3) se emplearon unos moldes.

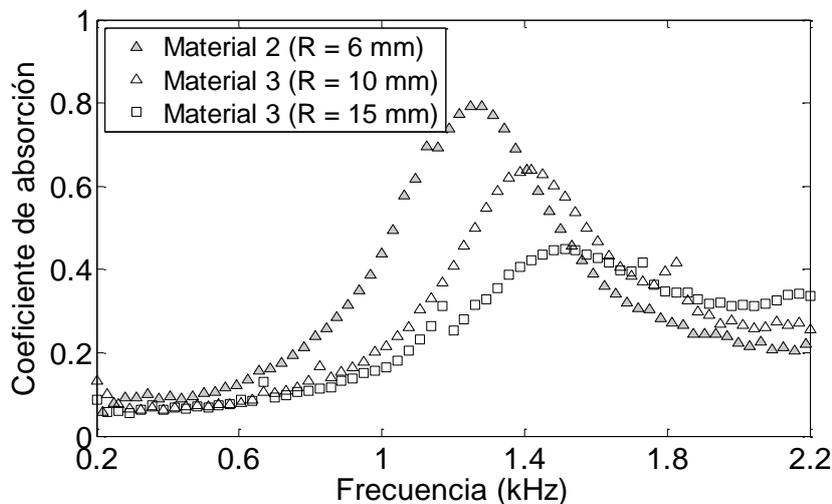


Figura 4 – Coeficiente de absorción sonora medido para diferentes muestras de hormigón perforado.

En ambos casos se puede apreciar que un mayor tamaño de perforación se traduce en una menor absorción sonora del material. A fin de obtener un incremento de este coeficiente de absorción deben seleccionarse cuidadosamente, no solo el material granular base, sino también el tamaño de los meso-poros. De hecho, Olny y Boutin [14] demostraron que este incremento es debido al efecto de difusión de presión que tiene lugar cuando existe un alto contraste entre escalas porosas, no siendo ese el propósito en las muestras preparadas y cuyo análisis se presenta en este trabajo.

4.3 Validación de los modelos

El modelo de Horoshenkov y Swift [13] permite predecir el comportamiento acústico de las mezclas granulares cuando se conocen sus propiedades físicas. Para el caso de las muestras meso-perforadas, a partir de dicha información y aplicando el modelo de Olny y Boutin [14], es posible también estimar éste. En la Figura 5 se verifica que las predicciones de ambos modelos y los ensayos en tubo de onda plana para muestras sin perforar y perforadas presentan una buena correlación en el rango de frecuencias de medida, si bien aparecen algunas discrepancias en altas frecuencias. En general, estas diferencias pueden deberse a las tolerancias de los dispositivos de medición, especialmente las de aquellos ensayos que emplean agua para determinar las propiedades físicas que sirven como datos de entrada a los modelos. Éstas también pueden ser el resultado de la rugosidad superficial de las probetas, del hecho de que no existe flujo de aire a través de los poros sin salida (poros conectados con el exterior solamente en un extremo de la muestra) o de que ambos modelos asumen un medio de longitud infinita (en la práctica las muestras tienen un espesor finito) con una geometría de microporo circular, siendo ésta generalmente desconocida o difícil de determinar.

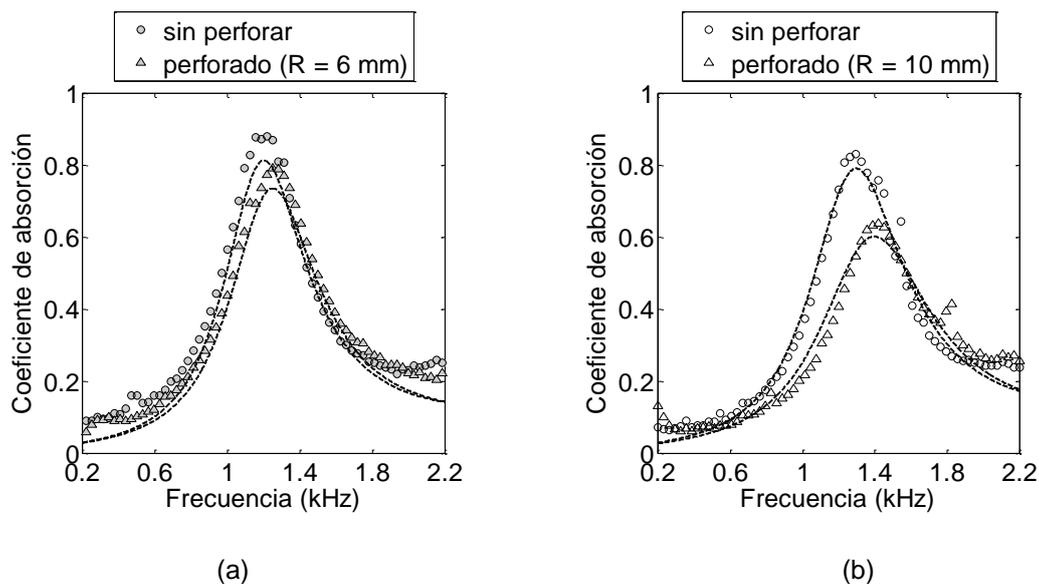


Figura 5 – Comparativa del coeficiente de absorción sonora medido (marcadores) y estimado analíticamente (líneas) para diferentes muestras de hormigón sin perforar y perforadas: (a) material 2 y (b) material 3.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado las propiedades físicas y acústicas de hormigón perforado elaborado a partir de agregados de arlita de distintos tipos y tamaños. Para ello, se ha preparado una serie de muestras a pequeña escala y se ha procedido a la realización de ensayos en tubo de onda plana para determinar su absorción sonora. Los resultados indican que este tipo de materiales ofrecen una absorción acústica relativamente alta y pueden considerarse una alternativa sostenible a otras soluciones comúnmente empleadas en aplicaciones prácticas. Adicionalmente, se han realizado predicciones de esta propiedad acústica tomando modelos teóricos cuyos parámetros de entrada pueden determinarse con ensayos experimentales básicos. La comparación de los resultados analíticos muestra una buena correlación con las medidas, lo cual confirma que los modelos considerados pueden utilizarse con éxito en el diseño de este tipo de hormigón perforado. No obstante, y aunque los resultados preliminares son prometedores de cara a su uso en las industrias de la construcción y las obras públicas, sería interesante evaluar otras propiedades y otras proporciones de mezcla.

REFERENCIAS

- [1] DB-HR (2007) Documento Básico “DB-HR Protección frente al ruido” del Código Técnico de la Edificación.
- [2] Maa, D. Y. (1987) Microperforated-panel wideband absorbers. *Noise Control Eng. J.* **29** (3), 77-84.
- [3] Beranek, L. L. y Vér, I. L. (1992) *Noise and vibration control engineering: Principles and applications*. John Wiley and Sons, Nueva York.
- [4] Ingard, K. U. (1994) *Notes on sound absorption technology*. Noise control foundation, New York, Poughkeepsie.
- [5] Atalla, N. y Sgard, F. (2007) Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *J. Sound Vib.* **303** (1-2), 195-208.
- [6] Randeberg, R. T. (2000) Perforated panel absorbers with viscous energy dissipation enhanced by orifice design. Tesis doctoral, NTNU, Noruega.

- [7] Sakagami, K., Nagayama, Y., Morimoto, M. y Yairi, M. (2009) Pilot study on wideband sound absorber obtained by combination of two different microperforated panel (MPP) absorbers. *Acoust. Sci. Technol.* **30** (2), 154-156.
- [8] Tayong, R. (2013) On the holes interaction and heterogeneity distribution effects on the acoustic properties of air-cavity backed perforated plates. *Appl. Acoust.* **74** (12), 1492-1498.
- [9] Carbajo, J., Ramis, J., Godinho, L., Amado-Mendes, P. y Alba, J. (2015) A finite element model of perforated panel absorbers including viscothermal effects. *Appl. Acoust.* **90**, 1-8.
- [10] Zwikker, C. y Kosten, C. W. (1949) *Sound absorbing materials*. Elsevier, Nueva York.
- [11] Attenborough, K. (1983) Acoustic characteristics of rigid-fibrous absorbents and granular materials. *J. Acoust. Soc. Am.* **73** (3), 785-799.
- [12] Johnson, D. L., Koplik, J. y Dashen, R. (1987) Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *J. Fluid Mech.* **176** (1), 379-402.
- [13] Horoshenkov, K. V. y Swift, M. J. (2001) The acoustic properties of granular materials with pore size distribution close to log-normal. *J. Acoust. Soc. Am.* **110** (5), 2371-2378.
- [14] Olny, X. y Boutin, C. (2003) Acoustic wave propagation in double porosity media. *J. Acoust. Soc. Amer.* **114** (1), 73-89.
- [15] Auriault, J. L. y Boutin, C. (1994) Deformable media with double porosity – III: Acoustics. *Transp. Porous Media* **14** (2), 143-162.
- [16] Sgard, F. C., Olny, X., Atalla, N. y Castel, F. (2005) On the use of perforations to improve the sound absorption of porous materials. *Appl. Acoust.* **66** (6), 625-651.
- [17] Bécot, F. X., Jaouen, L. y Gourdon, E. (2008) Applications of the dual porosity theory to irregularly shaped porous materials. *Acta Acust. United Ac.* **94** (5), 715-724.
- [18] Dazel, O., F. X. Bécot y Jaouen, L. (2012) Biot effects for sound absorbing double porosity materials. *Acta Acust. United Ac.* **98** (4), 567-576.
- [19] Doutres, O., Atalla, N. y Osman, H. (2015) Transfer matrix modeling and experimental validation of cellular porous material with resonant inclusions. *J. Acoust. Soc. Amer.* **137** (6), 3502-3513.
- [20] Bonwetsch, T., Bärtschi, R., Kobel, D. Gramazio, F. y Kohler, M. (2007) Digitally fabricating tilted holes: experiences in tooling and teaching design. *Predicting the future, Proceedings of the 24th Annual Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe*. Frankfurt, Alemania, 793-800.
- [21] Kohler, M., Gramazio, F. y Willmann, J. (2014) *The robotic touch: how robots change architecture*. Park Books, Zurich.
- [22] Horoshenkov, K. V., Hughes, D. C. y Cwirzen, A. (2003) The sound speed and attenuation in loose and consolidated granular formulations of high alumina cements. *Appl. Acoust.* **64** (2), 197-212.
- [23] Glé, P., Gourdon, E., Arnaud, L., Horoshenkov, K. V. y Khan, A. (2013) The effect of particle shape and size distribution on the acoustical properties of mixtures of hemp particles. *J. Acoust. Soc. Am.* **134** (6), 4698-4709.
- [24] Carbajo, J., Esquerdo-Lloret, T. V., Ramis, J., Nadal-Gisbert, A. V. y Denia, F. D. (Aceptado) Acoustic properties of porous concrete made from arlite and vermiculite lightweight aggregates. *Mater. Construcc.*
- [25] ISO 10534-2: (1998) Acoustics-Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes-Part 2: Transfer-function method.
- [26] Vasina, M., Hughes, D. C., Horoshenkov, K. V. y Lapčík Jr, L. (2006) The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates. *Appl. Acoust.* **67** (8), 787-796.
- [27] Nelder, J. A. y Mead, R. (1965) A simplex method for function minimization. *Comput. J.* **7** (4), 308-313.

- [28] Umnova, O., Attenborough, K., Shin, H-C. y Cummings, A. (2005) Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials. *Appl. Acoust.* **66** (6), 607-624.
- [29] Ingard, K. U. y Dear, T. (1985) Measurement of acoustic flow resistance. *J. Sound Vib.* **103** (4), 567-572.
- [30] Leclaire, P., Kelders, L., Lauriks, W., Melon, M. Brown, N. y Castagnède, B. (1996) Determination of the viscous and thermal characteristic lengths of plastic foams by ultrasonic measurements in helium and air. *J. Appl. Phys.* **80** (4), 2009-2012.