

## VALIDACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA MEDIDA DE POROSIDAD

PACS: 43.55.Ev

del Rey, Romina<sup>1</sup>; Alba, Jesús<sup>1</sup>; Arenas, Jorge P.<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València, Campus de Gandía  
C/Paraninfo, 1  
46730 Grao de Gandia, Valencia, España.  
roderey@doctor.upv.es, jesalba@fis.upv.es  
<sup>2</sup>Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile  
Casilla 567,  
Valdivia, Chile  
jparenas@uach.cl

**Palabras Clave:** Materiales, Porosidad, Absorción sonora, Modelos acústicos, Caracterización de materiales

### ABSTRACT

Porosity is one of the characteristic parameters of fibrous and cellular sound absorbing materials. It represents the ratio between the air volume held by the material and the total volume of the material itself. This parameter is included in several theoretical models of sound absorption, both in the time- and frequency-domain. However, porosity is difficult to determine, and its measure usually requires either direct or indirect techniques which are relatively complex. In this work, a custom-made porosity measuring device is evaluated. The device is based on the measure of the change in pressure as the volume changes by keeping the temperature constant. The open porosity of a material sample can be estimated from these data.

### RESUMEN

La porosidad es un parámetro característico de los materiales absorbentes de fibra o de poro. Representa el ratio entre el volumen de aire que contiene el material respecto al volumen total que ocupa. Este parámetro forma parte de numerosos modelos de comportamiento de estos materiales, tanto temporales como frecuenciales. Sin embargo, no es un parámetro fácil de medir y requiere de técnicas directas o indirectas, que son relativamente complejas. En este trabajo se evalúa un dispositivo construido para la medida de la porosidad. El dispositivo se basa en evaluar, a temperatura constante, los cambios de presión si hay cambios de volumen. Con estos datos, se estima el valor de la porosidad.

### INTRODUCCION

La porosidad es junto con la resistencia al flujo uno de los parámetros de mayor relevancia de los modelos para caracterizar materiales absorbentes acústicos.

La propuesta de modelos para la predicción del comportamiento acústico de materiales absorbentes es una línea de investigación de gran interés desde hace tiempo. Estos modelos se

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

han propuesto tanto para el dominio temporal como el frecuencial, siendo éstos últimos más comunes. Normalmente, estos modelos [1-5] permiten obtener la impedancia característica y constante de propagación, de este tipo de medio a partir de parámetros físicos del material. Estos modelos buscan la caracterización completa de materiales porosos o fibrosos, a partir de diferentes parámetros tales como la porosidad, las densidades de fibra, la densidad del material, el módulo de compresibilidad, la resistencia específica al flujo, el factor de estructura, la tortuosidad, etc. Cada uno de estos modelos presenta sus propias limitaciones y sólo se puede utilizar bajo ciertas condiciones.

No obstante, en términos generales, parece haber dos grandes grupos: los que utilizan como parámetros clave la resistencia al flujo y los que utilizan como parámetro relevante la porosidad. En el primer grupo podemos citar los trabajos como el de Delany&Bazley [1] basado en un modelo empírico y concebido para materiales absorbentes fibrosos como las lanas minerales. A partir de este trabajo han ido apareciendo otros con mejoras numéricas o adaptados a un tipo de material en concreto [6-10]. Los autores de este trabajo, en base al modelo de Delany & Bazley han estado trabajando para mejorar la predicción de nuevos materiales absorbentes [11-14]. Para ello se han esforzado en entender, diseñar y poner en marcha distintos dispositivos de medida de resistencia al flujo [15][16].

Entre los modelos en el dominio de la frecuencia que utilizan como parámetro relevante la porosidad hay que citar los modelos empíricos de Voronina [17-20]. Los autores también han intentado modelar, en base a los modelos de Voronina, la porosidad de espuma recicladas [21]. Otro de los autores que necesita de la porosidad como parámetro de entrada en sus modelos es Johnson [22]. También destacar el reciente trabajo de Tang et al [23] donde se pone de manifiesto la importancia de la resistencia al flujo y la porosidad para la caracterización acústica de textiles.

En este trabajo se evalúa un dispositivo construido para la medida de la porosidad, siguiendo inicialmente la propuesta de Champoux et al [24] y proponiendo posteriormente correcciones que mejoran el cálculo de la porosidad y reducen el error de ensayo.

### CONSTRUCCION DEL POROSIMETRO

El dispositivo de Champoux et al [24] se basa en evaluar, a temperatura constante, los cambios de presión si hay cambios de volumen. Con estos datos, se estima el valor de la porosidad.

Para materiales con poros abiertos y una estructura elástica, como es el caso de las espumas plásticas, se define la porosidad como la razón entre el volumen de aire contenido y el volumen total ocupado por la muestra de material. Dado que la absorción de las ondas sonoras al interior del material depende de los poros abiertos, sólo se considera el volumen de aire de los poros abiertos y los cerrados forman parte de la estructura del material. Basado en un trabajo previo de Beranek (1942), Champoux et al. [24] desarrollaron un método experimental para medir el volumen de aire contenido en la muestra de material y así determinar la porosidad. Este consiste en producir un cambio isotérmico del volumen de aire contenido en un espacio cerrado y el cambio de la presión permite, a través de la ley de los gases ideales, determinar el volumen de aire contenido en la muestra. El equipo desarrollado se esquematiza en la Figura 1. El material se coloca en una cámara cilíndrica, el desplazamiento del pistón se mide con un micrómetro y la variación del volumen contenido provoca una variación de la presión la que es medida mediante un manómetro diferencial.

Usando el mismo principio ya señalado, se diseñó y construyó un equipo para determinar la porosidad en muestras de materiales porosos. El esquema del aparato se muestra en la Figura 2. A través de la válvula 03 se llena el contenedor 01 con aire a presión, manteniendo cerrada

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

las válvulas 04, 05 y 07. Enseguida, en el contenedor 08 se coloca la muestra abriendo la tapa (ver detalle figura 2). Una vez colocada la muestra, se cierra la tapa hermética y se abre la válvula 04 para igualar presiones. A continuación se cierra la válvula 04 y se abren las válvulas 05 y 07. Se desplaza muy lentamente el husillo 09 con el pistón 11, midiendo el desplazamiento con el micrómetro 10. La variación de presión se mide en el manómetro digital 06. La Figura 3 muestra una fotografía del dispositivo construido.

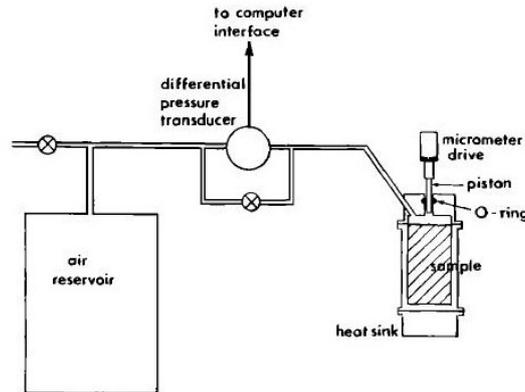


Figura 1. Esquema de funcionamiento. Original de Champoux et al [24]

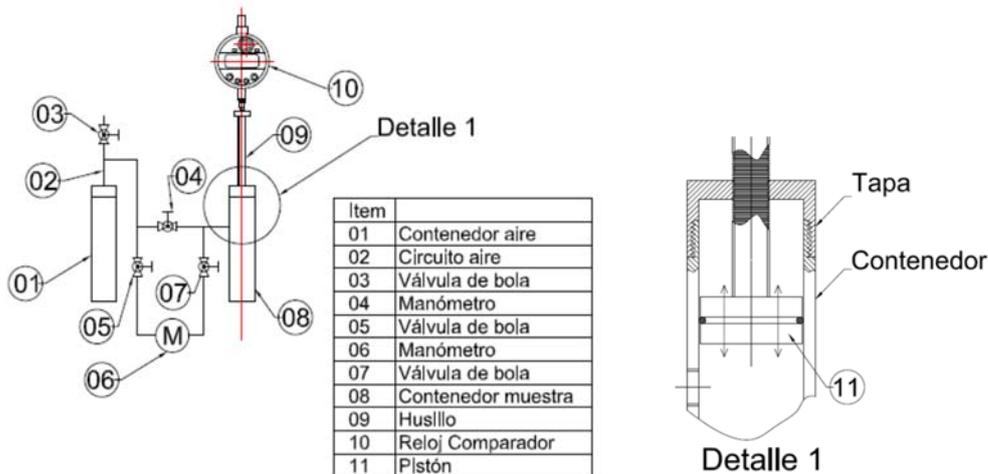


Figura 2. Esquema de equipo para medir la porosidad

Para verificar la sensibilidad del medidor de porosidad construido, se confeccionó un patrón de porosidad conocida, el cual consiste de un cilindro de bronce (densidad  $8,46 \text{ g/cm}^3$ ), de diámetro  $62,5 \text{ mm}$  y altura  $20 \text{ mm}$ , al que se le confeccionaron  $553$  perforaciones de  $1 \text{ mm}$  de diámetro y  $9,5 \text{ mm}$  de profundidad. Al calcular la razón entre el volumen de aire contenido y el volumen del patrón, se encuentra que la porosidad nominal en este caso es de  $\phi=0,07$ .

### MEDIDA DE LA POROSIDAD

El dispositivo de Champoux et al [24] para la medida de la porosidad se basa en el fundamento de la primera Ley de la Termodinámica, asumiendo que se produce un proceso isoterma cuando se aumenta el volumen del dispositivo  $\Delta V$  produciendo así una disminución de la presión dentro del sistema  $\Delta P$ . La condición del proceso isoterma es que el producto de la presión por el volumen se mantiene constante. Esto se expresa en la siguiente ecuación:

$$P_0 V' = (P_0 + \Delta P)(V' + \Delta V) = K \quad (1)$$

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

$$V' = V_a + V_0$$

Siendo  $P_0$  la presión atmosférica, y  $V'$  el volumen total de aire contenido en el pistón, que está formado el volumen residual de aire  $V_0$  en el pistón, que se obtiene por calibración previa, y  $V_a$ , el aire confinado dentro de la muestra a ensayo. La muestra ocupa un volumen total  $V_t = V_a + V_m$  con  $V_m$  el volumen asociado a la parte de material que no es aire. Despejando de la ecuación (1) se obtiene la siguiente expresión para obtener  $V_a$ :

$$V_a = V' - V_0 = -\frac{P_0 + \Delta P}{\Delta P} \Delta V - V_0 \quad (2)$$

Una vez obtenida  $V_a$ , la porosidad se obtiene:

$$\phi = \frac{V_a}{V_t} \quad (3)$$

Hay que tener en cuenta que en Champoux et al [24] se proponen medidas de  $\Delta P$  muy pequeñas. Si la presión atmosférica,  $P_0$  es de 760 mmHg, el valor de  $\Delta P$  de los ensayos realizados en el trabajo original es como máximo de 1 mmHg, lo que asegura que sólo se produce un aumento de volumen del aire,  $\Delta V$ , y que otros efectos son despreciables, cumpliéndose la ecuación (2).



Figura 3. Prototipo construido

A continuación se muestra en la tabla 1 una medida de espuma de poro abierto, con diferentes condiciones de aumentos de volúmenes y la aplicación de las ecuaciones (1) a (3) con  $P_0 = 760$  mmHg,  $V_t = 91,54$  cm<sup>3</sup>, y  $V_0 = 529,42$  cm<sup>3</sup> en la calibración previa. En la tabla puede verse cómo se superan los valores de  $\Delta P$  llegando hasta 22,80 mmHg. Esto aumenta el error de la medida, y produce esas oscilaciones en el resultado de la porosidad que debería ser constante e independiente del incremento de volumen  $\Delta V$ .

$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta P$ (mmHg)	$V'$ (cm <sup>3</sup> )	$V_a$ (cm <sup>3</sup> )	$\phi$
12,47	-15,20	610,98	81,56	0,89
14,03	-17,00	613,09	83,67	0,91
15,59	-19,00	607,86	78,45	0,86
17,14	-20,90	606,30	76,89	0,84

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

18,70	-22,80	604,75	75,33	0,82
-------	--------	--------	-------	------

Tabla 1. Datos de ensayo en base a las fórmulas de Champoux et al

Para mejorar la obtención de la porosidad, se parte de la suposición genérica de que en gases reales el proceso puede ser politrópico, es decir, que cumple la condición:

$$P_0 V'^n = (P_0 + \Delta P)(V' + \Delta V)^n = K \quad (4)$$

De la ecuación (4) pueden obtenerse los diferentes procesos. Para  $n=1$  estaríamos en un proceso isoterma, en  $n=\infty$  en un proceso isócoro, en  $n = 0$ , isobárico, y en  $n = C$ , en un posible proceso adiabático. Partiendo de la ecuación (4) y aplicando logaritmos, se linealiza la ecuación:

$$\log(P_0 + \Delta P) = -n(V' + \Delta V) + \log(K) \quad (5)$$

Se obtiene así la ecuación de una recta que permite un ajuste mínimo-cuadrático,  $y = ax+b$ , donde puede verse cada elemento por comparación con la ecuación (5). El valor de  $n$  del ajuste debería ser 1 para el caso que nos ocupa de proceso isoterma. El valor de  $b = \log(K)$  también es importante ya que permite obtener el valor de calibración de volumen,  $V'$ , en el caso de que no haya muestra, y el valor de  $V_a$ , en el caso de que haya muestra.

### PROPUESTA DE CALIBRACIÓN

Para calibrar el porosímetro, es decir, básicamente para obtener  $V'$ , que sin muestra debe coincidir con  $V_0$ , se diseña un método numérico sencillo que se basa en la ecuación (5), donde se introduce el valor de  $V'$  de forma iterativa con la condición de que  $n = 1$ . El método converge a este valor en todos los casos. Una vez llegada a la convergencia,  $V'$  será el valor obtenido en la iteración final. También puede obtenerse a través de la ecuación:

$$P_0 V' = K \quad (6)$$

Donde el valor de  $K$  se obtiene del término independiente  $b$  del ajuste. Tanto el valor por iteración final, como el obtenido a través de  $b$ , deben coincidir, por coherencia. Además, la ecuación (6) representa el valor obtenido cuando  $\Delta P$  tiene a cero, lo que eliminaría el error asociado a la presión citado anteriormente.

En la figura 4 se muestra el ajuste realizado para la calibración con la pieza sin perforar de la figura 4. Puede verse cómo se consigue obtener  $n = 1$  y que  $b = \log K = 5,6016$ . En la tabla 2, se muestran los datos tomados para la calibración, y los valores finales del procedimiento de ajuste para  $V'$ , con el dato final del valor de  $K$  por medida. Del valor de  $b$  se obtiene que  $V' = 525,8 \text{ cm}^3$ . El ajuste da como iteración final  $524,9 \text{ cm}^3$ . Por tanto, puede verse que la diferencia es mínima. Si el pistón tiene un diámetro de 6,3 cm, el valor de la altura del pistón en el momento de empezar a medir, es de 18,839 cm, valor coherente con la altura del pistón. También es observable el alto grado de ajuste, con un valor prácticamente de 1 (0,9999) que garantiza la estabilidad de la medida a temperatura constante.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

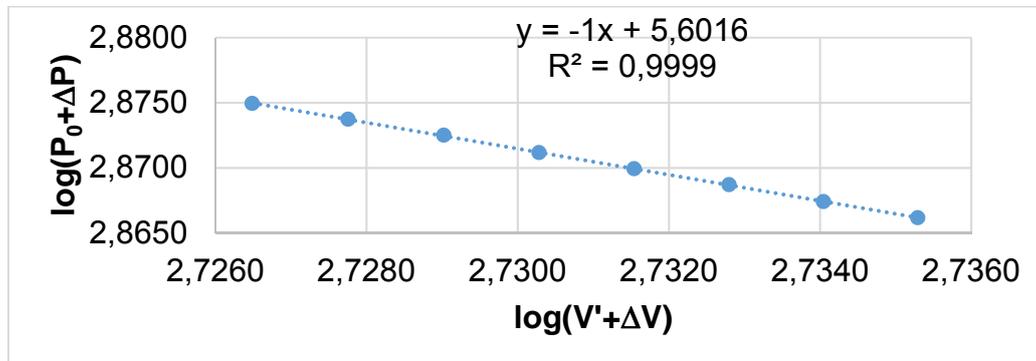


Figura 4. Calibración del porosímetro

$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta P$ (mmHg)	$P_0+\Delta P$	$V'+\Delta V$	$\log(V'+\Delta V)$	$\log(P_0+\Delta P)$	$PV = K$
7,8	-10,2	749,8	532,7	2,7265	2,8749	399423
9,4	-12,3	747,7	534,3	2,7278	2,8737	399470
10,9	-14,4	745,6	535,8	2,7290	2,8725	399510
12,5	-16,7	743,3	537,4	2,7303	2,8712	399436
14,0	-18,8	741,2	538,9	2,7315	2,8699	399463
15,6	-20,9	739,1	540,5	2,7328	2,8687	399483
17,1	-23,1	736,9	542,1	2,7340	2,8674	399442
18,7	-25,2	734,8	543,6	2,7353	2,8662	399449

Tabla 2. Datos de medida y ajuste de la calibración

### PROCEDIMIENTO DE MEDIDA DE LA POROSIDAD

El procedimiento de medida en el porosímetro es similar a la calibración. Una vez determinado  $V_0$  en la calibración, se introduce una muestra en el pistón y se realiza un procedimiento de medida similar con incrementos de volumen,  $\Delta V$ , midiendo los cambios de presión  $\Delta P$ . Con estos datos, se realiza un ajuste de nuevo basado en la ecuación (5) que se itera hasta conseguir que el valor de  $n$  sea 1. Una vez ajustado, tanto del valor de  $b = \log(K)$  como de la última iteración, se obtiene  $V'$ , y conocida  $V_0$ , se obtiene  $V_a$ .

Se muestra el ejemplo con la misma muestra de la tabla 1. En la tabla 3, se muestran los datos tomados para la calibración, y los valores finales del procedimiento de ajuste para  $V'$ , con el dato final del valor de  $K$  por medida. En la figura 5 aparece la representación del ajuste en su última iteración. Puede verse el grado de ajuste y que  $b = \log K = 5,6479$ . Se obtiene el valor de  $V_a = 69,45$  cm<sup>3</sup> por la última iteración y del valor de  $K$  se obtiene  $V_a = 70,04$  cm<sup>3</sup>. Para el primer caso la porosidad es de 0,76 y para el segundo de 0,77. Puede verse la estabilidad y la obtención única de la porosidad. Además, se ha eliminado el error de medida que se aprecia en la tabla 1.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

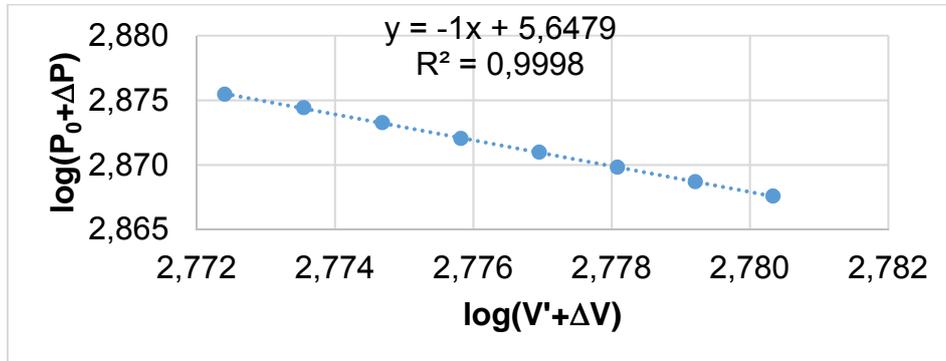


Figura 5. Ajuste de la espuma ejemplo.

$\Delta V$ (cm <sup>3</sup> )	$\Delta P$ (mmHg)	$P_0+\Delta P$	$V'+\Delta V$	$\log(V'+\Delta V)$	$\log(P_0+\Delta P)$	$PV = K$
7,8	-9,3	750,7	592,1	2,7724	2,8755	444499
9,4	-11,1	748,9	593,7	2,7735	2,8744	444601
10,9	-13,1	746,9	595,2	2,7747	2,8733	444577
12,5	-15,2	744,8	596,8	2,7758	2,8720	444488
14,0	-17	743,0	598,3	2,7770	2,8710	444572
15,6	-19	741,0	599,9	2,7781	2,8698	444530
17,1	-20,9	739,1	601,5	2,7792	2,8687	444543
18,7	-22,8	737,2	603,0	2,7803	2,8676	444549

Tabla 3. Datos de medida para la muestra de espuma ejemplo

## RESULTADOS

Con esta técnica, se han ajustado diferentes muestras de espumas plásticas recicladas de diferentes densidades, como la que se muestra en la figura 3. En la tabla 4 se resumen los datos. Se representan dos porosidades, la primera directamente del ajuste y la segunda obtenida con la K. El procedimiento siempre parte de la calibración inicial, para posteriormente, medir cada muestra. En todos los casos puede verse el grado de parecido de los dos datos de porosidad. El coeficiente de regresión está en el caso peor en 0,9998.

Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Espesor (cm)	Porosidad	Porosidad 2
Espuma reciclada plástica LBT1 (M11)	16,6	2,86	0,79	0,78
Espuma reciclada plástica LBT1 (M12)	16,6	2,9	0,78	0,78
Espuma reciclada plástica LBT1 (M13)	16,6	2,79	0,87	0,87
Espuma reciclada plástica LAT1 (M11)	22,4	3,00	0,9	0,9
Espuma reciclada plástica LAT1 (M21)	22,4	3,00	0,97	0,96
Espuma reciclada plástica LAT1 (M22)	22,4	2,96	0,97	0,96
Espuma reciclada plástica EBT1 (M11)	25,2	3,28	0,77	0,76
Espuma reciclada plástica EBT1 (M12)	25,2	3,26	0,77	0,77
Espuma reciclada plástica EBT1 (M22)	25,2	3,1	0,79	0,78

## FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre

Espuma reciclada plástica EAT1 (M11)	24,3	3,16	0,97	0,97
Espuma reciclada plástica EAT1 (M12)	24,3	3,17	0,92	0,91
Espuma reciclada plástica EAT1 (M13)	24,3	3,22	0,92	0,91

Tabla 4. Resumen de ensayos de diferentes espumas plásticas recicladas.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un prototipo de un porosímetro diseñado según Champoux et al [24] y también una técnica numérica sencilla que mejora la obtención de los resultados de la porosidad con un error mucho más bajo que las fórmulas originales de [24].

En el caso de las muestras ensayadas, puede verse la coherencia de los resultados de porosidad. En general, las de alta porosidad, tipo LAT y EAT, están por encima de 0,9 de porosidad. Las que el fabricante considera de baja porosidad, LBT y EBT, están en general en el margen 0,76-0,80, aunque se ha visto alguna anomalía, que debe acharcarse a que los materiales tienen un origen reciclado y presentan alguna anomalía.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Study on the design and use of acoustical eco-materials for noise control in buildings” financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile (Fondecyt 1171110) y por la Universitat Politècnica de Valencia en su prograda de AYUDAS PARA ESTANCIAS DE PERSONAL DOCENTE E INVESTIGADOR EN CENTROS DE INVESTIGACION DE PRESTIGIO, del Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia, PAID0017.

## REFERENCIAS

- [1] Delany M. E., Bazley E. N., “Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials”, Applied Acoustics 3, (1970), 105 -116.
- [2] Allard J.F. Champoux Y., “New Empirical Equations For Sound Propagation In Rigid Frame Fobrous Materials”, Journal of the Acoustical Society of America 91 (6), (1992) 3346-3353.
- [3] Attenborough K., “Acoustical characteristics of porous materials” Physics Reports (Review Section of Physics Letters), 82, nº3, (1982) 179-227.
- [4] Attenborough K., “Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials”, Journal of the Acoustical Society of America 73(3) (1983), 785-799.
- [5] Voronina N., “Acoustical properties of fibrous materials”, Applied Acoustics 42 (1994), 165-174. [6] Garai M., Pompoli F.A. Simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, Applied Acoustics, 66, 12, 1383–1398. (2005)
- [6] Miki Y., “Acoustical Properties of Porous Materials – Modifications Of Delany-Bazley Models-”, Journal of the Acoustical Society Jpn (E) 11, 1 (1990) 19-24.
- [7] Miki Y. “Acoustical properties of porous materials-Generalizations of empirical models” Journal of the Acoustical Society Jpn (E) 11, 1 (1990) 25-28.
- [8] I.P.Dunn, W.A. Davern, “Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers”, Applied Acoustics, 19, 1986, pp. 321-334.
- [9] M. Garai, F. Pompoli, “A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications”, Applied Acoustics 66 (2005) 1383–1398.
- [10] X. Wang et al. Multi-stage, “Regression analysis of acoustical properties of polyurethane foams”. Journal of Sound and Vibration 273 (2004) 1109–1117.



## FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-  
24 al 26 de octubre**

- [11] del Rey R, Alba J, Ramis J, Sanchis V. New absorbent acoustics materials from plastic bottle remnants. *Materiales de Construcción*, 61,204, 547-558. (2011).
- [12] Ramis J, del Rey R, Alba J, Godinho L., Carbajo J. A model for acoustic absorbent materials derived from conocut fiber. *Materiales de Construcción*, 64,313. (2014).
- [13] del Rey, R.; Uris, A.; Alba, J.; Candelas, P. Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications. *Materials*, 10, 1277. (2017)
- [14] Ramis, J.; Alba, J.; Del Rey, R.; Escuder, E.; Sanchis, V. New absorbent material acoustic based on kenaf's fibre. *Mater. Constr.* 60, 133–143 (2010)
- [15] Del Rey R., Alba J., Arenas J.P., Ramis J. Evaluation of Two Alternative Procedures for Measuring Airflow Resistance of Sound Absorbing Materials. *Archives of Acoustics*, 38(4), 547-554 (2013).
- [16] Alba J., Arenas J.P., Del Rey R., Rodriguez J.C.; Dispositivo electroacústico para la medida de la resistividad al flujo del aire, FIA 2018, Cadiz.
- [17] N. Voronina, "Improved Empirical Model of Sound Propagation Through a Fibrous Material", *Applied Acoustics*, Vol 48, nº 2, pp 121-132, (1996).
- [18] N. Voronina, "An Empirical Model for Elastic Porous Materials, *Applied Acoustics*", Vol 55, nº 1, pp 67-83, (1998).
- [19] N. Voronina, "An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity". *Applied Acoustics* 58 (1999) 295-304.
- [20] N. Voronina, K.V. Horoshenkov. "A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media". *Applied Acoustics* 64 (2003) 415–432.
- [21] Del Rey, R.; Alba, J.; Arenas, J.P.; Sanchis, V. An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam. *Appl. Acoust.* 73, 604–609. (2012)
- [22] D. L. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, "Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media," *J. Fluid Mech.* 176, 379– 402, (1987).
- [23] Tang X., Jeong Ch., Yan X. Prediction of sound absorption based on specific airflow resistance and air permeability of textiles. *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, EL100 (2018)
- [24] Champoux, Y., Stinson, M. R., and Daigle, G. A. (1991). Air-based system for the measurement of porosity, *Journal of the Acoustical Society of America* 89(2), 910-916.