

# COMPARATIVA DE MEDIDA DE LA POROSIDAD DE MATERIALES SOSTENIBLES POR MÉTODOS ACÚSTICOS Y ÓPTICOS

Romina del Rey Tormos<sup>1</sup>, Jesús Alba Fernández<sup>2</sup>, Juan Carlos Rodríguez Vercher<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandia. España  
{roderey@fis.upv.es}

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandia. España  
{jesalba@fis.upv.es}

<sup>3</sup> Universitat Politècnica de Valencia. Escuela Politécnica Superior de Gandia. España  
{juarodve@upv.edu.es}

## Resumen

La medida de la porosidad de materiales absorbentes acústicos no es sencilla, y aún es más compleja cuando se trata de materiales provenientes de reciclados o de origen natural. Existen diferentes técnicas para determinarlas, cada una de ellas con sus limitaciones. Es interesante este parámetro puesto que suele utilizarse en muchos modelos acústicos para predecir el comportamiento del material.

En este trabajo se comparan dos procedimientos para obtener la porosidad aplicados a materiales sostenibles. El primer método realiza un reconocimiento de contorno de imágenes de microscopía. A través de este análisis de contorno y mediante el estudio del primer plano, se obtiene una estimación de la porosidad. El segundo método se basa en el comportamiento acústico del módulo de compresibilidad complejo a baja frecuencia. Para ello, se realizan mediciones de este parámetro y a partir de él se obtiene la porosidad. Los resultados de ambos métodos se muestran y discuten en este trabajo para este tipo de materiales que presentan mayor heterogeneidad.

**Palabras clave:** porosidad, módulo de compresibilidad complejo, acústica, óptica, absorbentes acústicos

## Abstract

The measurement of porosity in acoustic absorbent materials is not straightforward, and it becomes even more complex when dealing with materials sourced from recycling or natural origins. Various techniques exist to determine porosity, each with its limitations. This parameter is interesting because it is often used in many acoustic models to predict material behavior.

In this study, two procedures for assessing porosity in sustainable materials are compared. The first method involves contour recognition using microscopy images. By analyzing the contours and studying the surface details, an estimation of porosity is obtained. The second method relies on the acoustic behavior of the complex compressibility modulus at low frequencies. Measurements of this parameter are taken, and porosity is derived from it. The results of both methods are presented and discussed in this work, particularly for materials that exhibit greater heterogeneity.

**Keywords:** Porosity, complex compressibility modulus, acoustics, optics, acoustic absorbents.

**PACS n°.** 43.55.Ev

## 1 Introducción

La obtención de modelos de predicción del comportamiento acústico de materiales absorbentes es de gran interés desde hace varios años, y sigue estando de actualidad, puesto que aparecen progresivamente nuevos materiales menos agresivos con el medio ambiente. Existen tanto modelos en 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 materiales a partir de parámetros físicos del material. En ellos se busca 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. Entre los modelos en el dominio de la frecuencia que utilizan como parámetro relevante la porosidad hay que citar los modelos empíricos de Voronina y aplicaciones [6–10]. Modelos conocidos como el JCAL también necesitan de éste y otros parámetros [11–14].

En este trabajo se evalúan dos mecanismos para obtener la porosidad de materiales absorbentes acústicos. Un primer método que se basa en la medida del módulo de compresibilidad del material a baja frecuencia, y un segundo método que analiza el primer plano de imágenes de microscopio. Se comparan resultados entre sí y se validan con ensayo de laboratorio externo.

## 2 Procedimientos de medida de la porosidad

En este apartado se resumen los dos métodos seguidos para obtener la porosidad. El primer método, que se basa en medidas acústicas, y el segundo que se basa en el análisis de imágenes de microscopio.

### 2.1 Propuesta de procedimiento acústico de medida de la porosidad

Para determinar la porosidad se parte del dispositivo que se presenta en Napolitano et al. [15], que permite medir el módulo de compresibilidad complejo  $K$  a baja frecuencia de materiales porosos ( $f < 500$  Hz). En el trabajo de Napolitano et al., se presentan dos variantes para la medición, una primera con la cavidad superior llena de material poroso y una segunda en la que solo una parte de la cavidad se llena de material, colocando el micrófono de la cavidad superior en la zona de aire (ver Figura 1). En ambos casos, se realiza una medición de calibración con la cavidad superior vacía para obtener los volúmenes acústicos de las cavidades, considerando el espacio ocupado por los componentes físicos del altavoz.

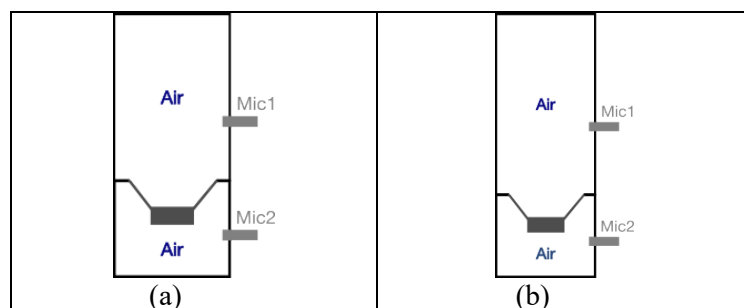


Figura 1. Dispositivos vacíos con dos volúmenes de cavidad diferentes utilizados para fines de medición y calibración.

Teniendo en cuenta la configuración descrita, cuando la cavidad superior está vacía (*caja vacía*), se puede obtener la compliancia acústica utilizando la Ecuación 1:

$$C_{Aempty} = \frac{V_{empty}}{\gamma P_0}, \quad (1)$$

donde  $V_{empty}$  es el volumen de la cavidad vacía en litros -considerando el volumen del cono del altavoz, determinado durante el procedimiento de calibración-,  $\gamma$  es la relación calorífica específica adimensional, y  $P_0$  es la presión atmosférica estática.

El módulo aparente, la densidad del aire y la relación calorífica específica son, respectivamente,  $K = 1.42 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ,  $\rho_m = 1.184 \text{ kg/m}^3$ ,  $\gamma = 1,4$ , en condiciones normales  $P_0 = 101325^2$  y  $c_0 = 346.31 \text{ m/s}$ .

En el caso de que la cavidad superior esté llena de material poroso fonoabsorbente (caso lleno), la compliancia acústica viene dada por la ecuación (2).

$$C_{Afull} = \frac{V_{full}\phi}{K}, \quad (2)$$

donde la porosidad abierta, y el módulo dinámico de volumen, ( $\phi$  y  $K$ , respectivamente), aparecen relacionados entre sí. Entonces, en el caso del sistema completo, tendremos un valor complejo para  $C_{Afull}$ .

Si el sistema se describe como una asociación de admitancias acústicas, en el caso del sistema vacío, la admitancia total viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{Z_{Atot,empty}} = \left(\frac{U}{p}\right)_{empty} = -j\omega C_{A_{down}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{empty} - j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma P_0}, \quad (3)$$

mientras que, en caso de que la cavidad superior esté llena de material poroso, tenemos:

$$\frac{1}{Z_{Atot,full}} = \left(\frac{U}{p}\right)_{full} = -j\omega C_{A_{down}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{full} - j\omega \frac{V_{up}\phi}{K}, \quad (4)$$

donde  $U$  es la velocidad volumétrica en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $C_{A_{down}}$  es la compliancia acústica de la cavidad inferior en  $\text{m}^5/\text{N}$  y  $V_{up}$  es el volumen de la cavidad superior en  $\text{m}^3$ .

Las impedancias superficiales de los casos vacío y lleno se pueden igualar porque tienen las mismas condiciones de contorno en el sistema:

$$\frac{K}{\phi} = \frac{\gamma P_0}{1 - \frac{V_{down}}{V_{up}} \left( \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{full} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{empty} \right)}. \quad (5)$$

Ahora, cuando la cavidad superior se llena parcialmente con material (*caja semillena*), el aire y el material poroso en la cavidad superior forman una red de cumplimiento paralela. Esto modifica la admitancia acústica total del sistema, lo que se traduce en:

$$\frac{1}{Z_{Atot,semifull}} = \left(\frac{U}{p}\right)_{semifull} = -j\omega C_{A_{down}} \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{semifull} - \frac{1}{Z_{Atot}}, \quad (6)$$

donde se puede calcular a partir de las entradas de aire y material:  $Z_{Atot}$

$$\frac{1}{Z_{Atot}} = \frac{1}{Z_{Air}} + \frac{1}{Z_{AK}}. \quad (7)$$

Las ecuaciones de equiparación (3) y (6) obtienen:

$$-j\omega C_{Adown} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{semifull} - \frac{1}{Z_{Atot}} = -j\omega C_{Adown} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} - j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma P_0}, \quad (8)$$

y resolviendo la ecuación (8) para  $Z_{Atot}$  se obtiene:

$$\frac{1}{Z_{Atot}} = j\omega C_{Adown} \left( \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{semifull} \right) + j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma P_0} \quad (9)$$

Finalmente, al igualar las ecuaciones (5) y (7), obtenemos una expresión que da como resultado el valor de  $K$ :

$$Z_{Air} = \frac{\gamma P_0}{j\omega V_{air}} \quad (10)$$

$$Z_{AK} = \frac{K}{j\omega V_{por}\phi} \quad (11)$$

$$V_{up} = V_{por} + V_{air} \quad (12)$$

En ecuaciones (2) y (11), se puede ver la dependencia con la porosidad abierta. La asíntota de baja frecuencia de la parte real del módulo dinámico de compresibilidad [15] permite obtener el valor de la porosidad:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Re(K) = \frac{P_0}{\phi}, \quad (13)$$

El proceso de calibración se lleva a cabo midiendo dos cavidades superiores vacías con diferentes volúmenes:  $V_{empty1}$  y  $V_{empty2}$ .

Por lo tanto, se cumple la siguiente ecuación:

$$V_{down} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty2} + V_{empty2} = V_{down} \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty1} + V_{empty1} \quad (14)$$

Si resolvemos en la ecuación (15), el volumen de la cavidad inferior es:  $V_{down}$

$$V_{down} = \frac{V_{empty1} - V_{empty2}}{\left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty2} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)_{empty1}}. \quad (15)$$

Durante este proceso se utilizan dos cavidades superiores diferentes (véase Figura 1). Durante la medición del módulo dinámico de volumen de los materiales, solo se utilizó la cavidad superior con el menor volumen (Figura 1a) y el material se colocó en la parte superior, dejando un espacio de aire entre el altavoz y el material. En este caso, el volumen que queda en la cavidad superior de la membrana del altavoz se determina midiendo la carcasa de la cavidad vacía. Esta configuración se muestra en Figura 2.

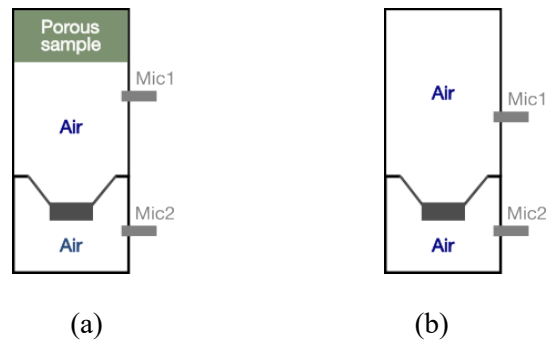


Figura 2. Configuración para medir el módulo dinámico a granel con la cavidad superior parcialmente llena con una muestra de material (a) y vacía (b).

## 2.2 Propuesta de obtención de la porosidad a través de imágenes

En este caso, el procedimiento propuesto se basa en la obtención previa de imágenes de microscopio. De estas imágenes se hace un análisis del “primer plano” para obtener una estimación de qué parte es aire y qué parte ocupa el material. El análisis de la imagen se realiza a través de librerías específicas de Matlab. Se ilustra con un material el procedimiento. En la figura 3 se muestra la imagen de microscopio y el análisis de primer plano obtenido en Matlab.

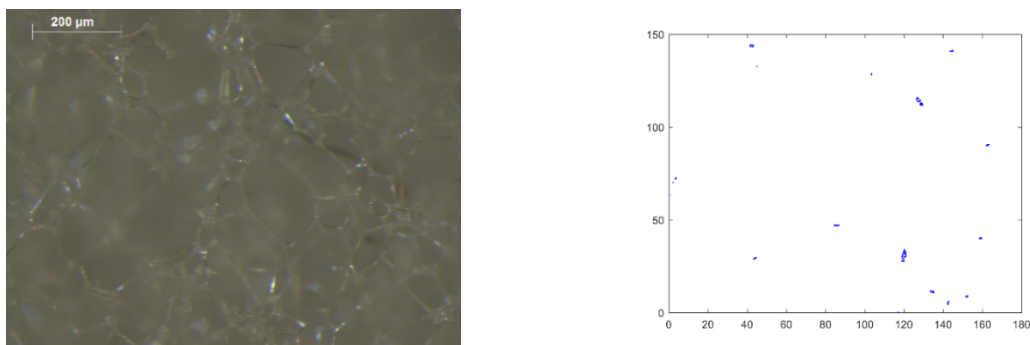


Figura 3. Imagen y análisis.

En este caso el valor de porosidad obtenido por este método y 3 muestras de cada material es de  $0,989 \pm 0,001$ . Se dispone del ensayo por laboratorio externo de este material con un valor de  $0,98 \pm 0,01$ . La limitación la marca en este método la claridad de la imagen, el tipo de imagen.

## 3 Resultados obtenidos

Se han elegido los siguientes materiales: (En la tabla 1 se resumen los datos básicos).

- Melamina de 4 cm del que se dispone ensayo en laboratorio externo.
- Espuma reciclada de 4 cm.
- Espuma reciclada de 2 cm.
- Lana de poliéster de 3,5 cm
- Lana de oveja de 4 cm.

A continuación, en las figuras 4 a 8 se muestran las medidas de baja frecuencia de la parte real del módulo de compresibilidad complejo, normalizado con la presión atmosférica de 101300 Pa. A partir de esas medidas, se obtiene el valor de la porosidad con la tendencia a frecuencia 0 Hz. En las figuras 9 a 12 se muestran imágenes de microscopio de los mismos materiales (excepto la melamina que se ha puesto como ejemplo en la figura 3). Se muestran un par de perfiles. Se resumen en la tabla 1 los resultados de ambos métodos con datos disponibles de laboratorio externo.

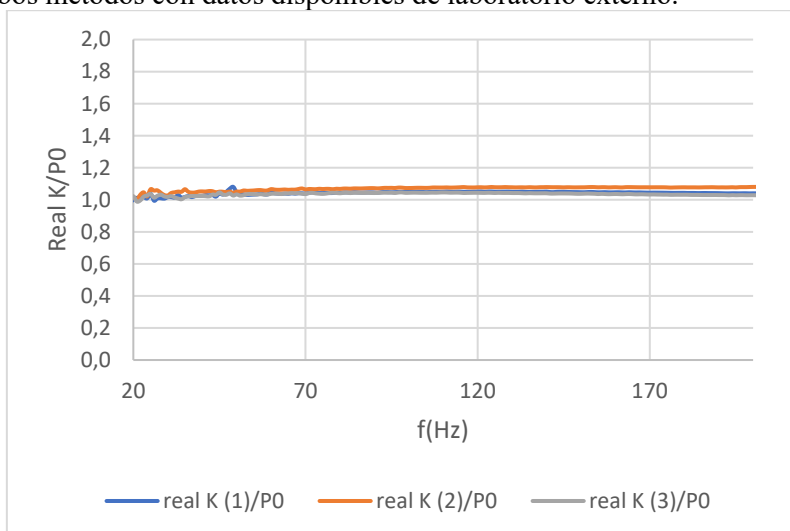


Figura 4. Parte real del módulo de compresibilidad complejo normalizado para melamina 4

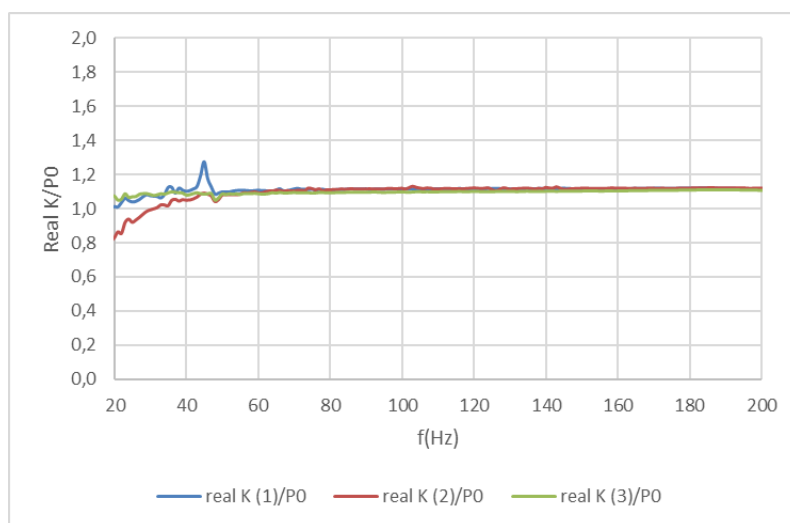


Figura 5 - Parte real del módulo de compresibilidad complejo normalizado para espuma reciclada de 4 cm

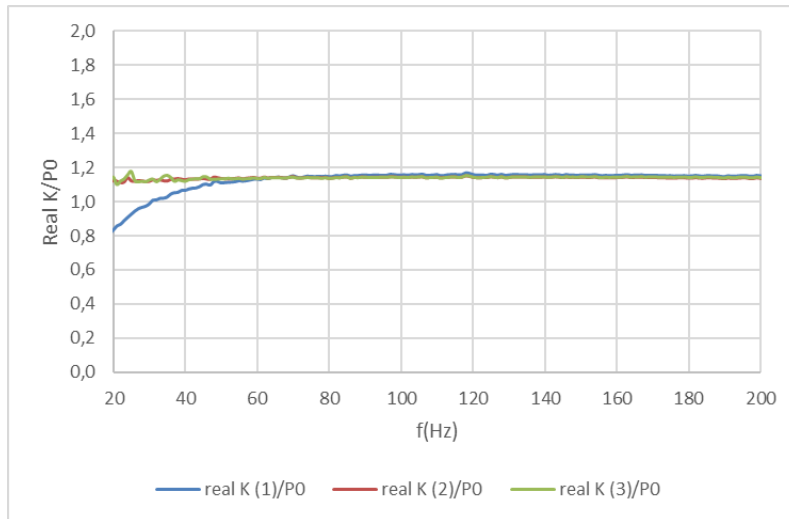


Figura 6 - Parte real del módulo de compresibilidad complejo normalizado para espuma reciclada de 2 cm

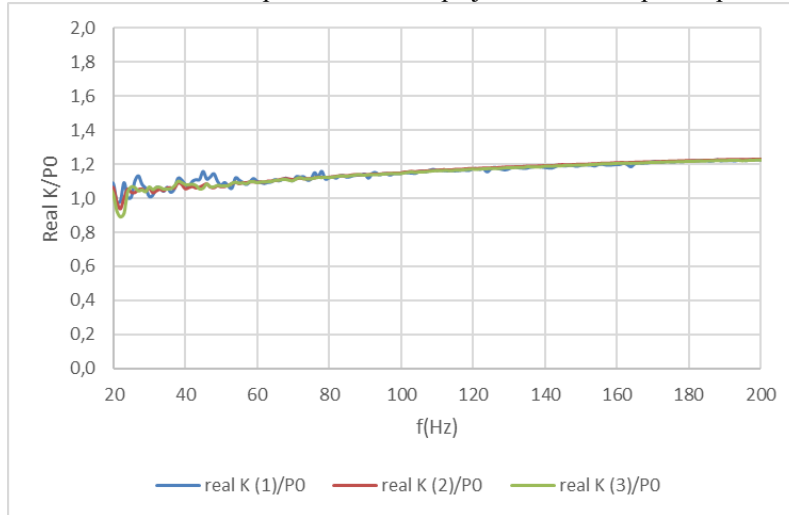


Figura 7. Parte real del módulo de compresibilidad complejo normalizado para lana de poliéster de 3,5 cm

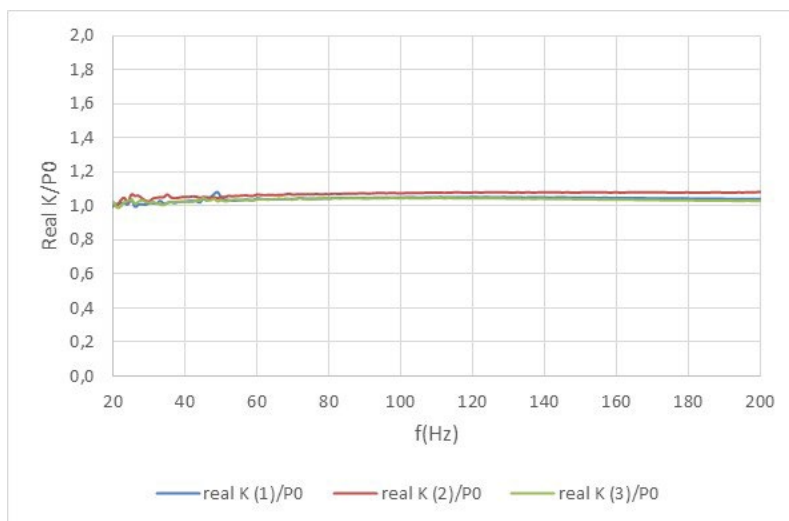


Figura 8 . Parte real del módulo de compresibilidad complejo normalizado para lana de oveja de 4 cm

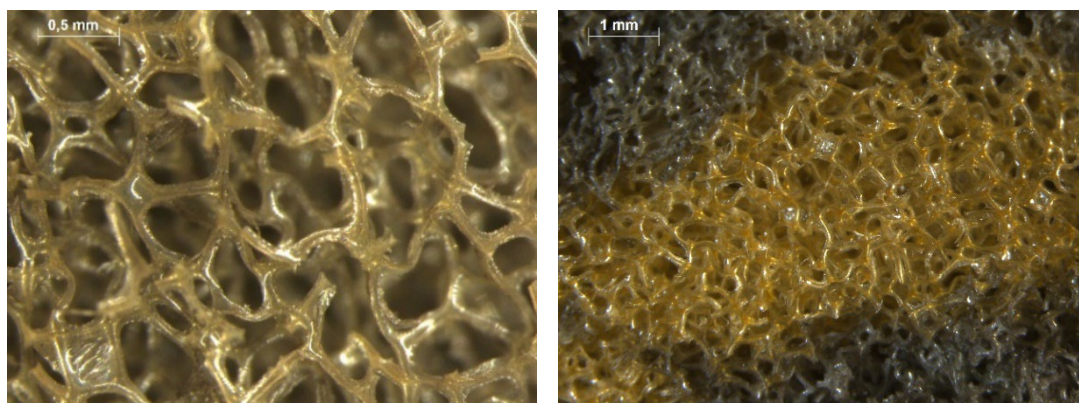


Figura 9 – Imágenes para espuma reciclada de 4 cm

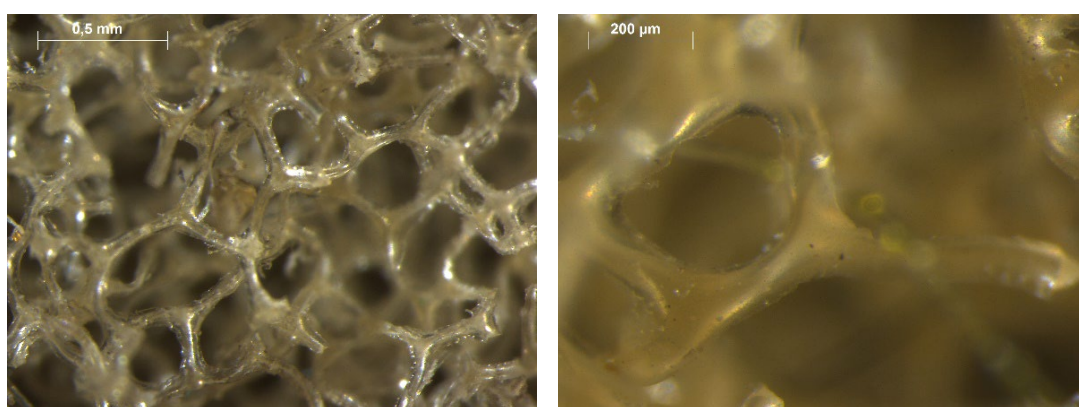


Figura 10 – Imágenes para espuma reciclada de 2 cm

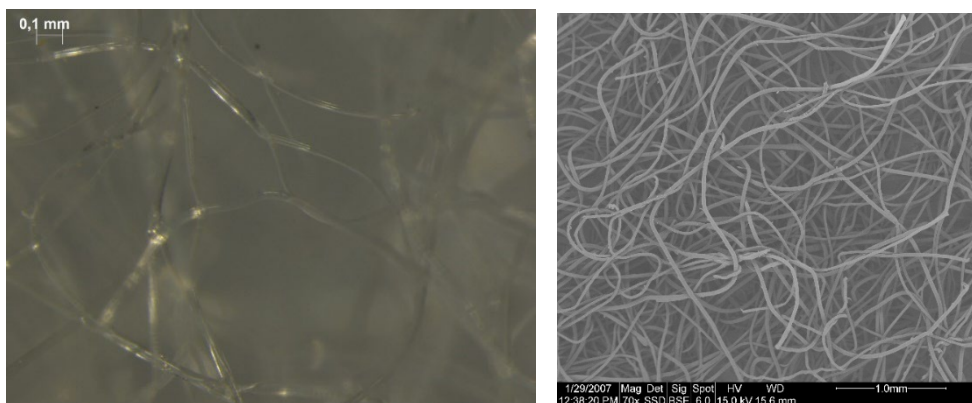


Figura 11 – Imágenes para lana de poliéster de 3,5 cm

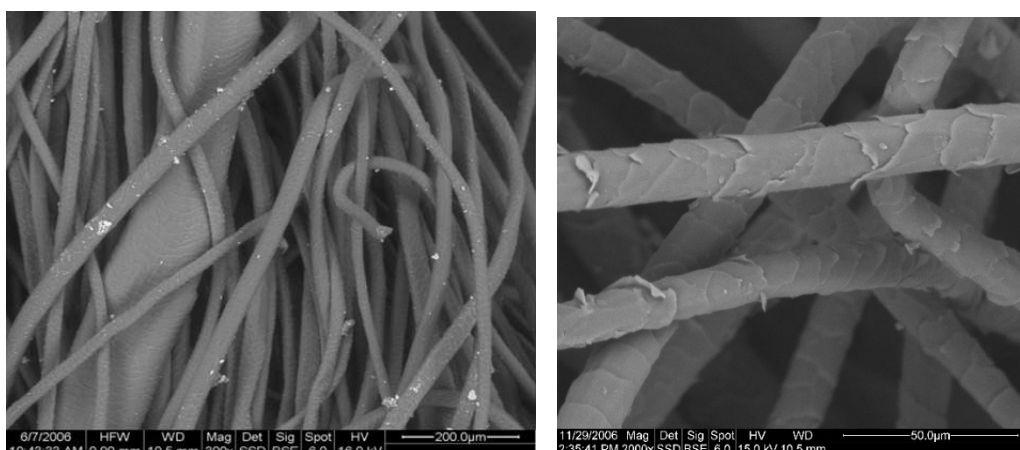


Figura 12 – Imágenes para lana de oveja de 4 cm

Tabla 1 – Comparativa de resultados de porosidad

	<b>Espesor (cm)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidad (acústica)</b>	<b>Porosidad (imagen)</b>	<b>Porosidad (Laboratorio externo)</b>
Melamina	4	10	0,99	0,98	0,98
Espuma reciclada	4	70	0,95	0,98	0,93
Espuma reciclada	2	110	0,94	0,95	(no se dispone)
Lana de poliéster	4	15	0,98	0,95	0,98
Lana de oveja	4	50	0,98	0,92	(no se dispone)

## 4 Conclusiones

En este trabajo se han comparado dos procedimientos para obtener la porosidad aplicados a materiales sostenibles. El primer método, método acústico se ha basado en el comportamiento acústico del módulo de compresibilidad complejo a baja frecuencia. Se han medido para varios materiales este parámetro y se ha obtenido la porosidad con el criterio de tendencia a frecuencia 0 Hz. Se puede ver que el método es relativamente estable, y que los resultados se asemejan bastante a los datos obtenidos por laboratorio externo. Teniendo en cuenta la heterogeneidad de los materiales ensayados, se podrían dar por válidos.

El segundo método realiza un reconocimiento de contorno de imágenes de microscopía. A través de este análisis de contorno y mediante el estudio del primer plano, se obtiene una estimación de la porosidad. En este caso se han tenido que tomar varias decisiones. Una es el grado de aumento adecuado. Se comprueba que, si el aumento es demasiado grande, el detalle no es adecuado para obtener un valor de porosidad. Si es demasiado pequeño, se produce demasiada distorsión en el primer plano. Esto condiciona el resultado. Debe tenerse una idea del rango en el que se mueve el poro o la fibra para poder elegir el rango más fiable. Otro problema es el enfoque. Imágenes que tengan cierto desenfoque no dejan obtener el primer plano con claridad. El problema se evidencia porque aparecen zonas de concentración de puntos debido al desenfoque. Además, el tipo o tecnología de la imagen también

influyen. Pueden verse como las imágenes para la lana de oveja son más antiguas (figura 12) y eso ha hecho que cueste identificar el plano.

En la comparativa de la tabla 1 se muestran los resultados. Aunque todavía quedan muchas pruebas por realizar, la técnica acústica parece ser más estable y ofrecer menos problemas.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Social Europeo y la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad - Generalitat Valenciana, a través del programa ACIF-2020 (ACIF/2020/401).

Financiado por una subvención AICO 2024 de la Conselleria de Educación, Universidades y Empleo, para difusión del proyecto CIAICO/2023/246 “METAMATERIALES FLEXIBLES MULTIFUNCIONALES SOSTENIBLES”.

### Referencias

- [1] M. E. Delany and E. N. Bazley, “Acoustical properties of fibrous absorbent materials,” *Appl. Acoust.*, vol. 3, no. 2, pp. 105–116, 1970.
- [2] J. Allard and Y. Champoux, “New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, no. 6, pp. 3346–3353, Jun. 1992.
- [3] K. Attenborough, “Acoustical characteristics of porous materials,” *Phys. Rep.*, vol. 82, no. 3, pp. 179–227, Feb. 1982.
- [4] K. Attenborough, “Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 73, no. 3, pp. 785–799, Mar. 1983.
- [5] N. Voronina, “Acoustic properties of fibrous materials,” *Appl. Acoust.*, vol. 42, no. 2, pp. 165–174, Jan. 1994.
- [6] N. Voronina, “Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material,” *Appl. Acoust.*, vol. 48, no. 2, pp. 121–132, Jun. 1996.
- [7] N. Voronina, “An empirical model for elastic porous materials,” *Appl. Acoust.*, vol. 55, no. 1, pp. 67–83, Sep. 1998.
- [8] N. Voronina, “An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity,” *Appl. Acoust.*, vol. 51, no. 2, pp. 181–198, Jun. 1997.
- [9] N. . Voronina and K. . Horoshenkov, “A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media,” *Appl. Acoust.*, vol. 64, no. 4, pp. 415–432, Apr. 2003.
- [10] R. del Rey, J. Alba, J. P. Arenas, and V. J. Sanchis, “An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam,” *Appl. Acoust.*, vol. 73, no. 6–7, pp. 604–609, Jun. 2012.
- [11] D. Johnson, J. Koplik, and R. Dashen, “Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media,” *J. Fluid Mech.*, vol. 176, pp. 379–402, 1987.
- [12] Y. Champoux and J.-F. Allard, “Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media,” *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 4, pp. 1975–1979, 1991.

- [13] D. Lafarge, P. Lemarinier, J. F. Allard, and V. Tarnow, “Dynamic compressibility of air in porous structures at audible frequencies,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 102, no. 4, pp. 1995–2006, 1997.
- [14] S. R. Pride, F. D. Morgan, and A. F. Gangi, “Drag forces of porous-medium acoustics,” *Phys. Rev. B*, vol. 47, no. 9, pp. 4964–4978, Mar. 1993.
- [15] Marialuisa Napolitano, Elio Di Giulio, Fabio Auremma, et al. (2022). Low frequency acoustic method to measure the complex bulk modulus of porous materials. *JASA* 151, 1545; doi: 10.1121/10.0009767