



# DISPOSITIVO ELECTROACÚSTICO PARA LA MEDIDA DE LA POROSIDAD DE MATERIALES POROSOS

Jesús Alba Fernández<sup>1\*</sup>  
Juan Carlos Rodríguez Vercher<sup>1</sup>  
Rodolfo Gustavo Venegas Castillo<sup>2</sup>  
Jorge Patricio Arenas Bermúdez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de Valencia, Escuela Politècnica Superior de Gandia

<sup>2</sup>Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile

## RESUMEN

Un parámetro de gran interés de los materiales absorbentes acústicos es su porosidad abierta, que comúnmente se conoce como porosidad. La porosidad se refiere a la relación del volumen de fluido ocupado respecto al volumen total de material poroso. Existen varios modelos predictivos de materiales absorbentes que se basan en este parámetro. Además, se suele necesitar para poder corregir su efecto en la resistividad al flujo del absorbente acústico.

Existen técnicas de medidas de diversa índole: técnicas basadas en la diferencia de presiones, en la saturación de líquidos, medidas por ultrasonidos, métodos ópticos, etc. Todas estas técnicas suelen ser complicadas o poco accesibles.

En este trabajo se presenta una propuesta de dispositivo para obtener la porosidad, midiendo previamente la impedancia eléctrica total, ofreciendo un procedimiento sencillo para el caso de materiales porosos. Se muestran algunos resultados obtenidos con materiales convencionales.

## ABSTRACT

A parameter of great interest of sound-absorbing materials is their open porosity, commonly referred to as porosity. Porosity refers to the ratio of the volume of fluid occupied to the total volume of porous material. Several predictive models of absorptive materials are based on this parameter. In addition, it is often needed to correct for its effect on the flow resistivity of the sound absorber.

There are measurement techniques of various kinds: techniques based on pressure difference, liquid saturation, ultrasonic measurements, optical methods, etc. All these techniques are usually complicated or not very accessible.

In this work, we propose a device to obtain the porosity, previously measuring the total electrical impedance, offering a simple procedure for porous materials. Some results obtained with conventional materials are shown.

**Palabras Clave**— materiales, porosidad, absorción sonora, modelos acústicos, caracterización de materiales.

## 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 medio 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 citar los modelos empíricos de Voronina y aplicaciones [6–10].

\* *Autor de contacto:* jesalba @fis.upv.es

*Copyright:* ©2023 First author et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Modelos conocidos como el JCAL también necesitan de éste y otros parámetros [11–14].

En este trabajo se evalúan dos dispositivos electroacústicos, uno pequeño y uno grande, que permiten obtener la porosidad a partir de la medición de su impedancia eléctrica total.

## 2. DISPOSITIVO ELECTROACÚSTICO PARA LA MEDIDA DE LA POROSIDAD

El dispositivo electroacústico es básicamente una caja cerrada donde se introduce el material absorbente acústico para ensayar (Figura 1). El circuito equivalente acústico se muestra en la Figura 2.

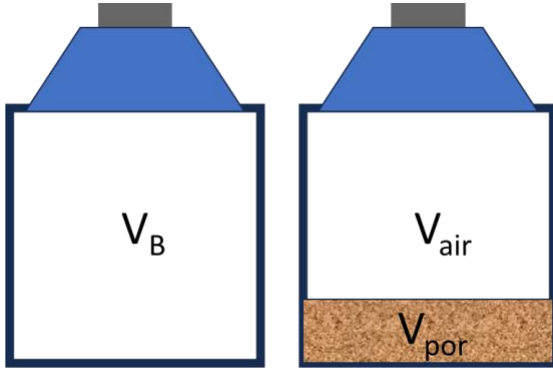


Figura 1. Sistema electroacústico.

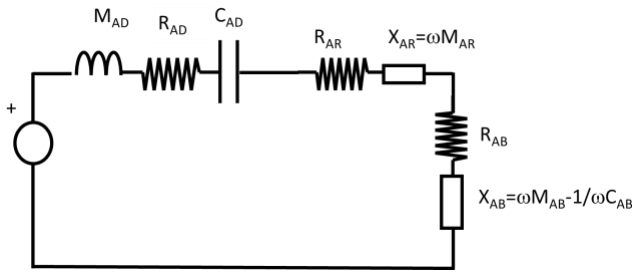


Figura 2. Circuito equivalente acústico.

El procedimiento se basa en la medida de la frecuencia de resonancia de la caja vacía ( $f_{emp}$ ) y de la medida de la frecuencia de resonancia de la caja con el material absorbente en su interior ( $f_{mat}$ ). En el caso de caja vacía la pulsación de resonancia es:

$$\omega_{emp} = \frac{1}{\sqrt{(M_{AD} + M_{AR} + M_{AB})C_{AT}}} \quad (1)$$

Donde  $M_{AD}$  representa el efecto acústico de la masa mecánica del altavoz ( $M_{MD}$ ),  $M_{AR}$  la masa acústica correspondiente a la impedancia de radiación trasera,  $M_{AB}$  la masa acústica del

efecto de radiación en el interior de la caja, y  $C_{AT}$  es la agrupación en serie de la compliancia acústica del altavoz ( $C_{AD}$ ) y la compliancia acústica de la caja ( $C_{AB}$ ):

$$\frac{1}{C_{AT}} = \frac{1}{C_{AD}} + \frac{1}{C_{AB}} \quad (2)$$

$$C_{AB} = \frac{V_B}{\gamma P_0} \quad (3)$$

$M_{AD}$  y  $C_{AD}$  son parámetros Thiele -Small del altavoz que se pueden encontrar en el propio catálogo,  $\gamma$  es la relación entre calores específicos, y  $P_0$  es la presión ambiente.  $V_B$  representa al volumen de la caja. En el caso de la caja con absorbente en su interior (Figura 1), la pulsación de resonancia es:

$$\omega_{mat} = \frac{1}{\sqrt{(M_{AD} + M_{AR} + M_{AB})C'_{AT}}} \quad (4)$$

La parte de masa se puede suponer que se mantiene prácticamente igual, y cambia la compliancia acústica total,  $C'_{AT}$ , que se obtiene a partir de la relación:

$$\frac{1}{C'_{AT}} = \frac{1}{C_{AD}} + \frac{1}{C_{Aup}} \quad (5)$$

$$C_{Aup} = \frac{V_{air}}{\gamma P_0} + \frac{V_{por}\phi^2}{P_0} \quad (6)$$

$C_{Aup}$  representa la compliancia acústica conjunta del volumen de aire  $V_{air}$  y del volumen que ocupa el material poroso  $V_{por}$ , cumpliéndose que  $V_B = V_{por} + V_{air}$ .  $\phi$  representa la porosidad del material absorbente. Tanto la relación (3) como la (6) sólo se cumplen a baja frecuencia, donde se pueden suponer elementos concentrados, y el módulo de compresibilidad del material poroso es aproximadamente  $\frac{P_0}{\phi}$ .

Del cociente de ambas pulsaciones (4) y (1):

$$\left(\frac{f_{mat}}{f_{emp}}\right)^2 = \frac{C_{AT}}{C'_{AT}} \quad (7)$$

Despejando:

$$V_{Aup} = \frac{1}{\left(\frac{f_{mat}}{f_{emp}}\right)^2 \left(\frac{1}{V_{AS}} + \frac{1}{V_B}\right) - \frac{1}{V_{AS}}} \quad (8)$$

$V_{AS}$  es el volumen acústico equivalente del altavoz, que también es un parámetro de Thiele-Small. De la expresión (6) se puede deducir que:

$$V_{Aup} \approx V_{air} + \gamma V_{por}\phi^2 \quad (9)$$

Se obtiene la porosidad combinando y despejando (8) y (9):

$$\phi \approx \sqrt{\frac{V_{Aup} - V_{air}}{\gamma V_{por}}} \quad (10)$$

El error del modelo depende de  $V_{AS}$ , la medida de  $V_{por} = d \cdot S_d$  y la determinación del volumen  $V_B = V_{por} + V_{air}$ , además de la condición de baja frecuencia.

### 3. PROTOTIPOS

Se han construido dos prototipos diferentes. El primer prototipo se muestra en la Figura 3. Es un prototipo de volumen pequeño, impreso en 3D, de 0.90 l, donde las muestras tienen 10 cm de diámetro. Para el prototipo se monta un altavoz Fonestar de 4" modelo 4FR40.



**Figura 3.** Prototipo de volumen pequeño.

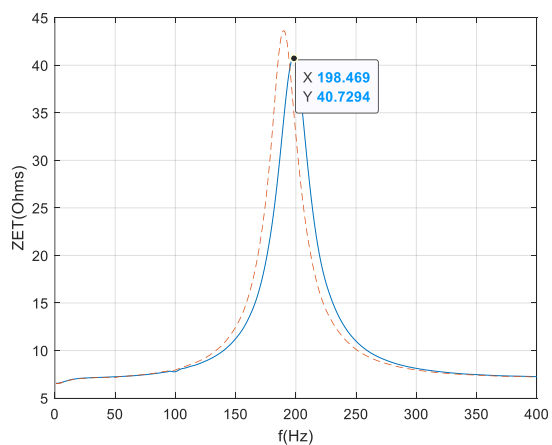
El segundo prototipo es de un volumen bastante superior para muestras grandes. Tiene un volumen de 119.9 l, para muestras de  $50.9 \times 50.9 \text{ cm}^2$ . En este caso se monta un altavoz Beyma 15K200.



**Figura 4.** Prototipo de volumen grande.

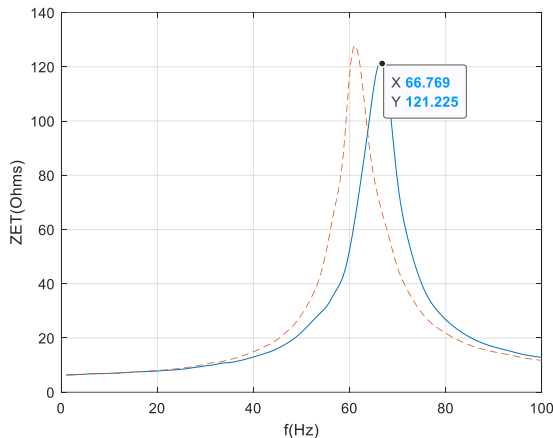
### 4. RESULTADOS

Se realizan pruebas iniciales en los dos prototipos. En el caso del prototipo pequeño, se muestra en la Figura 5 la medida de la impedancia eléctrica total  $Z_{ET}$  con el dispositivo vacío (línea continua) y con una muestra de 4 cm de foam aglomerado de  $80 \text{ kg/m}^3$  (línea discontinua). Puede verse la frecuencia de resonancia de 198.47 Hz del sistema vacío. En ese caso se obtiene una porosidad de 0.958. Se realiza también una medición con lana de poliéster de 3.5 cm de espesor, obteniendo una porosidad de 0.889.



**Figura 5.** Resultados de impedancia eléctrica total en el dispositivo pequeño.

Para el prototipo grande también se realizan las mismas medidas. En la Figura 6 se muestra la medida de impedancia eléctrica total de la caja vacía (línea continua) y con una muestra de lana de poliéster de 3.5 cm de las mismas características. Se observa una frecuencia de resonancia de 66.77 Hz en el caso del sistema vacío. Se obtiene una porosidad de 0.842 para este material. Se realiza la misma prueba para el mismo foam aglomerado de 4 cm obteniendo 0.969 de porosidad.



**Figura 6.** Resultados de impedancia eléctrica total en el dispositivo grande.

## 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

Se han construido dos prototipos electroacústicos para la medida de la porosidad, uno de volumen pequeño para muestras circulares de 10 cm de diámetro y otro de volumen grande para muestras cuadradas de 0.5 x 0.5 m<sup>2</sup>. Existe mayor necesidad de material en el dispositivo grande, como es obvio. Puede verse que en ambos casos la medida es sencilla, que los valores obtenidos para ambos materiales son similares, aunque no da exactamente lo mismo. Son varias las razones que pueden producir la divergencia. En el dispositivo pequeño el efecto de borde será mayor que en el grande. El corte para este dispositivo será más sensible. También el ajuste del volumen del dispositivo. El efecto del espacio que puede ocupar el altavoz se debe considerar. Además, también depende del parámetro  $V_{AS}$  de cada altavoz que debe ajustarse con seguridad en cada aparato.

Como futuras líneas, se va a definir un procedimiento de calibración para ajustar cada dispositivo y ampliar los materiales y número de ensayos, aunque a priori se obtienen valores coherentes.

## 6. 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).

## 7. 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.