

CONSTRUCTION AND COMPARISON OF OPEN POROSITY MEASUREMENT SYSTEMS FOR SOUND ABSORBERS

T.S. Gomez¹, M.A Navacerrada², P. Fernandez-Morales¹, M. Nakazato², D. De la Prida², A Pedrero², H. García-Mayén³

¹ Grupo de investigación sobre nuevos materiales, Universidad Pontificia Bolivariana
{tomas.gomez@upb.edu.co, patricia.fernandez@upb.edu.co}

² Grupo de investigación de Acústica Arquitectónica, E.T.S Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid
{mdelosangeles.navacerrada@upm.es, m.nakazato@alumnos.upm.es, danidelaprida@gmail.com, antonio.pedrero@upm.es}

³ Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Aix Marseille, Université
{e-mail: garcia@lma.cnrs-mrs.fr}

Resumen

Una alta porosidad es fundamental para facilitar la absorción del sonido. Si bien existen métodos para la obtención de la porosidad, los métodos por saturación con líquidos suelen subestimar la porosidad abierta al no saturar los poros más pequeños y los métodos de pycnometría requieren infraestructura de alto costo. En este trabajo se presentan los resultados de las mediciones de porosidad por dos métodos alternativos propuestos en la literatura; uno basado en la compresión isotérmica, definido por Beranek y el otro basado en la masa perdida por fuerza boyante, propuesto por Panneton y Gros. Se llevaron a cabo mediciones de porosidad de diferentes muestras de fibra de vidrio y lana de roca. Se encontró que el método de masa faltante presenta baja dispersión en los resultados con medias de porosidad entre 96% y 98% y desviaciones estándar entre 0.0005 % y 0.001% mientras que el método basado en compresión isotérmica presentaba medias de porosidad menores, entre 90% a 96%, y mayor dispersión de los resultados con desviaciones estándar entre 0.01% y 0.04%.

Palabras clave: porosidad, absorción del sonido, materiales

Abstract

High porosity is fundamental for materials to facilitate sound absorption. Although there are frequently used methods for obtaining porosity, liquid saturation methods usually underestimate open porosity by not reaching the smallest pores and pycnometer-based methods require high-cost infrastructure. In this research two alternative porosity systems proposed in the literature were developed; one based on isothermal compression, defined by Beranek, and the other based on mass lost by buoyant forces, proposed by Panneton and Gros. Porosity measurements of different fiberglass and rock wool samples were made. It was found that the missing mass method had low data dispersion with average porosity between 96% to 98% and standard deviations between 0.0005 % and 0.001%, while the isothermal compression method had lower porosity averages between 90% to 96% with standard deviations between 0.01% and 0.04%.

Keywords: porosity, sound absorption, materials.

PACS n°. 43.55.Ev,

1 Introducción

La absorción de la energía acústica por procesos disipativos viscoelásticos está supeditada a las propiedades de los materiales; en el caso de los materiales porosos, la tortuosidad, resistencia al flujo del aire y la porosidad son características fundamentales en dicho proceso disipativo.

Bajo la premisa de la importancia de dichas propiedades en la absorción del sonido, se han desarrollado con el tiempo diferentes métodos de cálculo de la impedancia y absorción de materiales con base en modelos, teóricos y empíricos. A medida que aumenta la complejidad de los modelos, se reduce el número de supuestos, un ejemplo de esto es el modelo de Delany y Bazley o Delany-Bazley-Miki, donde se asume una porosidad cercana al 100%, mientras que los modelos Johnson-Champoux-Allard (JCA) y sus extensiones requieren no solo la caracterización de la porosidad sino también las longitudes características viscosas y térmicas. Es así como la caracterización de estas propiedades se ha convertido en una necesidad para un análisis más profundo de la propagación del sonido por medios porosos.

El efecto de la porosidad sobre la absorción del sonido se ha estudiado en diferentes ocasiones, variando escalas de porosidad, tipología de poro (abierto-cerrado, abierto-abierto) y hasta geometría [1]–[4]. En estos estudios se observa que en general, hay consenso en que a mayor porosidad se aumenta la capacidad de absorción del sonido de los materiales. Si bien existe una variedad de métodos para obtener la porosidad de materiales y sedimentos, entre los métodos de Arquímedes y picnometría de gases, muchos de estos no se ajustan a las necesidades específicas del campo o, tienen costos muy elevados, que muchos laboratorios no se pueden permitir. Esto ha llevado a que se desarrollen una variedad de métodos por diferentes autores en el área de la acústica de materiales porosos. A continuación, se incluye una breve revisión de los métodos de medición de la porosidad de los materiales desarrollados en el tiempo, especialmente para finalidades acústicas.

Leo Beranek [5] introdujo un método sencillo para medir la porosidad de los materiales con fines de la caracterización acústica de los mismos. Se describe la porosidad como la razón del volumen de aire encerrado dentro del material sobre el volumen total del mismo. El sistema propuesto está compuesto por una cámara sellada donde se ubica la muestra y un manómetro con el que se mide el cambio de presión aire antes y después de ubicar la muestra.

Champoux et. al, en 1991 se desarrolló un nuevo sistema para la medición de la porosidad [6], éste se basa en la medición de la fracción de volumen de aire contenida en un material, intentando evitar el uso de líquidos para la medición y la estabilización del sistema. Con un pistón de diámetro conocido se realizan cambios de volumen de aire y así medir el cambio de presión con un transductor electrónico.

Después, en 1998, Panetton et. al [7], trazaron una metodología de medición basada en dinámica de gases. La ventaja de dicho método es que se incrementa los posibles materiales que se pueden estudiar, dado que los sistemas para medir porosidad con difracción por rayos X y saturación por líquidos solo puede utilizarse con muestras muy pequeñas.

P. Leclaire, Umnova et al [8], diseñaron un sistema de medición de porosidad en materiales sólidos con porosidad abierta influenciado por el sistema construido por Beranek. El método de medición se basa en la comparación de dos cámaras de aire, una de referencia y otra donde se ubica la muestra del material a medir. Proponen un sistema mejorado con pistones de calibración para inyectar o retirar volumen de aire de las cámaras.

Fella et. Al, realizaron estudios en materiales porosos de tipo granular [9], especialmente las propiedades de transporte que se caracterizan por los parámetros macroscópicos, entre estos, porosidad y tortuosidad

fueron medidos y comparados con evaluaciones en la literatura. Se propuso un método sencillo para medir porosidad y tortuosidad para un medio granular con poros saturados de aire. El método está basado en un modelo temporal de la propagación de las ondas a frecuencias ultrasónicas en un medio homogéneo e isotrópico con una red rígida.

En el 2004 Gros y Panneton [10] desarrollaron el método de la masa faltante, en este se mide el peso de las muestras en condiciones normales y en condiciones de vacío, para encontrar el error de masa faltante, el sustento teórico del método de medición es el principio de flotabilidad de Arquímedes, a partir del cambio de peso registrado de las muestras y la densidad del aire se puede obtener la porosidad de los materiales.

En el 2005 Olga Umnova [11] desarrolló un método para obtener la porosidad y tortuosidad de muestras gruesas de materiales porosos y rígidos de largas fibras o granos (mayores a un milímetro). El método utilizado se basa en dirigir pulsos con alta frecuencia central y con un amplio ancho de banda contra la muestra. En el rango de frecuencias que se usó, los efectos inerciales dominan la propagación del sonido en los poros, esto permite la aplicación de un límite en alta frecuencia del modelo del fluido equivalente. Se deduce la tortuosidad del límite en alta frecuencia de la velocidad de fase. La porosidad se obtiene del límite en alta frecuencia del coeficiente de reflexión una vez se conoce la tortuosidad.

Thomas Dupont, Philippe Leclaire y Panneton [12] propusieron dos métodos acústicos para medir la porosidad para un amplio rango de porosidades. Estos están basados en la transmisión acústica y en el conocimiento del comportamiento de indicadores acústicos en alta y baja frecuencia. El método para baja frecuencia es válido para altas porosidades, involucra mediciones en un tubo de transmisión. El método de alta frecuencia se basa en mediciones de ultrasonido.

2 Metodología

2.1 Materiales

Para hacer la comparación de porosidades por métodos de compresión isotérmica y masa faltante se seleccionaron muestras de fibra de vidrio y lana de roca utilizada para acondicionamiento acústico. Las muestras tenían un espesor de 2.5 y 5 cm y una densidad nominal de 30 kg/m³ y 60 kg/m³, respectivamente. Por cada espesor se seleccionaron 3 muestras de cada material.

Para los sistemas de medición se utilizó un recipiente de cierre hermético de 360 ml, al cual se le anexó una válvula la cual era utilizada para permitir la extracción de aire para generar efecto de vacío y cerrar el recipiente sin permitir la entrada de aire nuevamente. Por otro lado, esta válvula permitía la conexión de los conductos del aire al recipiente donde se alojaban las muestras.

2.2 Método de compresión Isotérmica

Se realizaron mediciones de porosidad en un equipo desarrollado en el laboratorio para porosidad siguiendo el método de compresión isotérmica. Se obtuvo la variación de la presión dentro de la cámara de medición, con el manómetro en U, una vez medidas las distancias recorridas por la columna de agua

y haciendo uso de la ley de Boyle, se calculó el cambio de volumen de aire dentro de la cámara y posteriormente la porosidad del material.

Se registró la presión con el manómetro a partir de la altura de las ramas de este teniendo la cámara vacía, posteriormente se realizó la medición de nuevo, pero con el material en la cámara cerrada herméticamente. Este método está restringido a que sea un proceso isotérmico por lo que debe hacerse lentamente y bajo condiciones térmicas controladas. El esquema del montaje planteado por Beranek se observa en la figura 1.

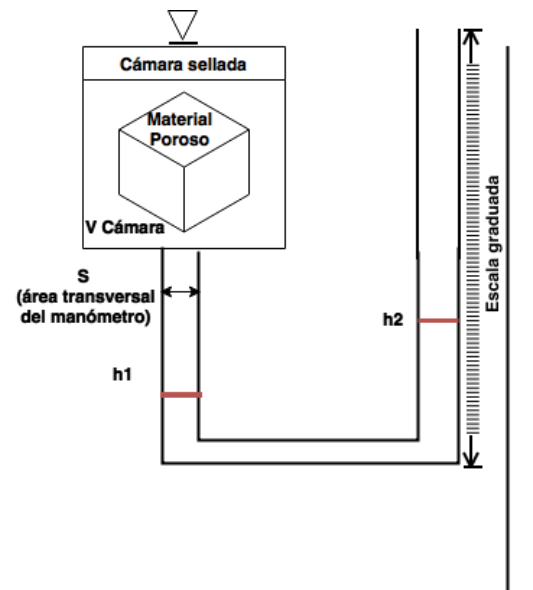


Figura 1 – Diagrama método de medición propuesto por Beranek

La ecuación (1) rige el proceso de medición, a partir de esta se obtiene la porosidad de las muestras de material utilizado.

$$\phi = \frac{P_0 \Delta V_a}{V_t \Delta P_0} = 1 - \frac{V_a}{V_t} \quad (1)$$

Donde ϕ , es la porosidad, V_t es el volumen total que ocupa el material estudiado, V_a es el volumen de aire contenido dentro del material, P_0 es la presión atmosférica, ΔP_0 es el cambio de la presión registrado en el manómetro, se encuentra a partir de la ecuación (2),

$$\Delta P_0 = h2 - h1 \quad (2)$$

Donde $h1$ y $h2$ son las alturas de agua registradas en el manómetro del sistema de medición. Siendo $h1$,

la altura registrada en la rama del manómetro conectada a la cámara de medición, y h_2 la altura en la rama sometida a presión atmosférica. ΔV_a es la reducción de volumen de aire dentro de la cámara, se obtiene con la ecuación (3)

$$\Delta V_a = S(\Delta P_0), \quad (3)$$

Donde S es la sección transversal del tubo conectado del manómetro a la cámara de medición.

2.3 Métodos de la masa faltante

El método de la masa faltante, desarrollado por Gros y Panetton [10], se rige por el principio de Arquímedes, más específicamente de la fuerza boyante presente en fluidos, tanto líquidos como gases. El sistema de medición estaba compuesto por un recipiente con cierre hermético que llevaba anexa una válvula, una bomba de vacío y una balanza analítica. El proceso de medición se basa en la comparación de la masa de un material bajo condiciones normales y en condiciones de vacío. Partiendo de la definición de V_s y V_a que son los volúmenes de sólido y del aire que satura los poros interconectados, el volumen total V , de un material poroso y su masa en condiciones de vacío M_I se pueden medir con precisión. La densidad de un compuesto se expresa en la ecuación (4)

$$\rho_I = (1 - \phi)\rho_S \quad (4)$$

Donde ϕ es la porosidad abierta definida en la ecuación (1), ρ_S es la densidad de la fracción sólida del material. Dado que la densidad de la fracción sólida de los materiales porosos es difícil de medir, se puede obtener a partir de la medición de la masa en condiciones de vacío, y calcular la razón entre la masa y el volumen total de la muestra, como muestra la ecuación (5).

$$\rho_s = \frac{M_I}{V_T} \quad (5)$$

Donde M_I , es la masa real del compuesto poroso, V_T es el volumen total de la muestra y ρ_s , es la densidad de sólido del material. Se debe medir bajo condiciones de vacío, porque tomando en cuenta el principio de flotabilidad de Arquímedes, el valor verdadero de la masa del sólido se está subestimando por la saturación de los poros con aire. El error de la masa faltante se describe por la ecuación (6)

$$\hat{M} = \rho_f(V_S) = M_I - M_I' \quad (6)$$

Donde M'_f es la masa aparente del material medida en una báscula bajo condiciones normales, M_f , es la masa real del elemento, medida en condiciones de vacío y ρ_f es la densidad del aire, la cual puede medirse o calcularse a partir de la ley de los gases ideales. La porosidad se calculó a partir de despejar el volumen de sólido y remplazarlo en la ecuación (1) se obtiene la siguiente expresión:

$$\phi = 1 - \frac{\hat{M}}{\rho_f V_T} \quad (7)$$

Donde \hat{M} es la masa faltante, ρ_f es la densidad del aire y V_T es el volumen total de la muestra.

3 Resultados

Las tablas 1 y 2 muestran el resumen de los resultados de las mediciones de porosidad por el método de compresión isotérmica (tabla 1) y por el método de masa faltante (tabla 2). En los resultados de porosidad por compresión isotérmica se puede ver que en promedio los valores de porosidad son mayores para las muestras con mayor espesor, mientras que la densidad no parece tener un efecto muy notorio sobre los resultados. La porosidad de los materiales separados por su espesor es similar, se puede ver que a medida que el espesor aumenta también lo hace la porosidad. Por otro lado, la desviación estándar también es mayor en las muestras con menor espesor, lo cual puede indicar una mayor imprecisión del sistema, esto causado por la relación de volúmenes entre el recipiente y la muestra.

Tabla 1. Resumen de resultados de porosidad por método de compresión isotérmica

Material	Fibra de vidrio, densidad 30 kg/m^3	Fibra de vidrio, densidad 30 kg/m^3	Lana de roca, densidad 60 kg/m^3	Lana de roca, densidad 60 kg/m^3
Espesor (cm)	2.50	5.00	2.50	5.00
Porosidad promedio (%)	0.90	0.94	0.91	0.96
Desviación Estándar (%)	$3.13 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$	$4.16 \cdot 10^{-2}$	$1.44 \cdot 10^{-2}$

La tabla 2 muestra una porosidad en general similar entre los materiales, exceptuando el caso de la fibra de vidrio con un espesor de 5 cm, la cual muestra un comportamiento atípico con respecto a las otras muestras medidas. Por otro lado, la desviación estándar de los materiales en general es pequeña en comparación con la magnitud de las propiedades medidas y con respecto al método de compresión isotérmica.

Tabla 2. Resumen de resultados de porosidad por método de masa faltante

Material	Fibra de vidrio, densidad 30 kg/m^3	Fibra de vidrio, densidad 30 kg/m^3	Lana de roca, densidad 60 kg/m^3	Lana de roca, densidad 60 kg/m^3
Espesor (cm)	2.50	5.00	2.50	5.00
Porosidad promedio (%)	0.96	0.98	0.96	0.96
Desviación Estándar (%)	$1.13 \cdot 10^{-3}$	$5.86 \cdot 10^{-5}$	$7.11 \cdot 10^{-5}$	$1.79 \cdot 10^{-4}$

La figura 2, muestra la distribución de los resultados de porosidad entre ambos métodos para cada tipo de material y espesor, en primer lugar, se nota la diferencia en la dispersión de los datos entre ambos métodos, siendo el método de masa faltante el que presenta una dispersión remarcablemente baja en comparación con el método de compresión isotérmica. Adicionalmente, los resultados de porosidad por compresión isotérmica parecen ser afectados por la densidad de la muestra, lo cual se refuerza una vez calculado el coeficiente de correlación de Pearson (0.7), dicho comportamiento no se ve en los resultados de porosidad por método de masa faltante con un coeficiente de correlación de Pearson de (-0.02).

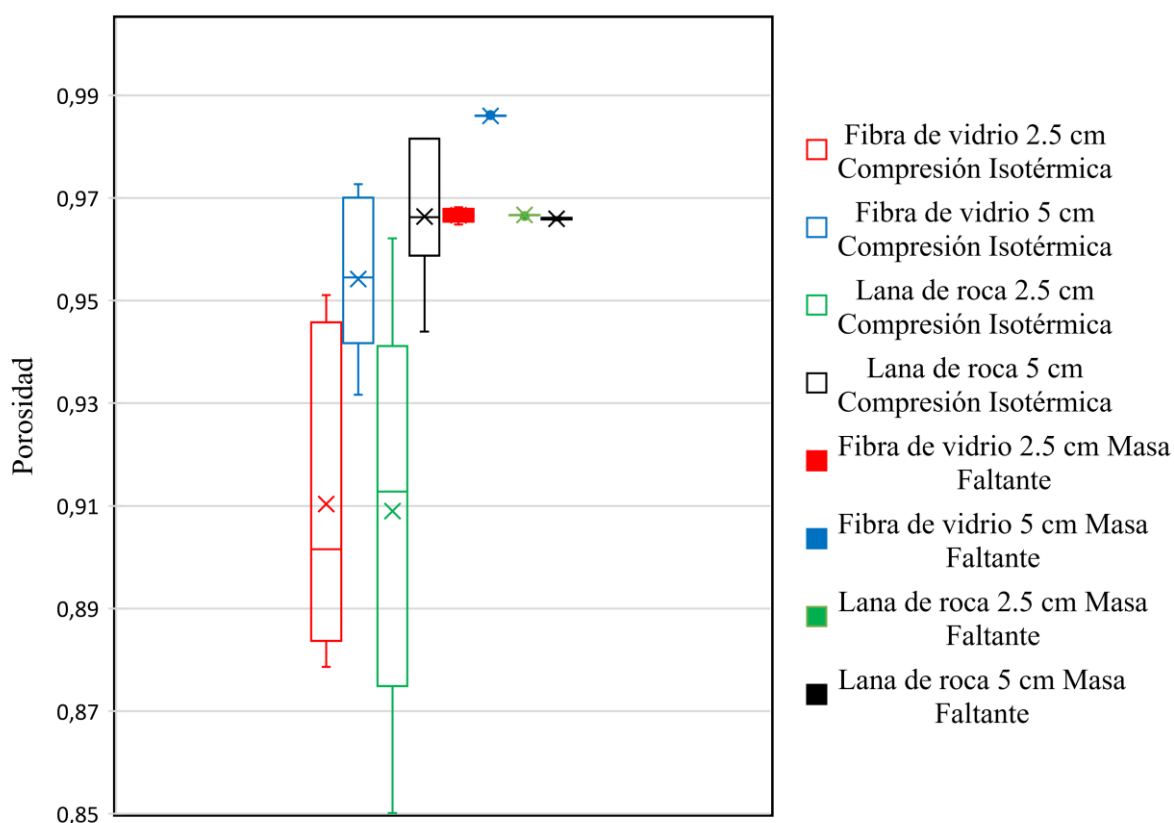


Figura 2: Diagrama de cajas y bigotes, representando la distribución de los resultados de porosidad en cuartiles

4 Conclusiones

Se realizaron mediciones de porosidad en dos sistemas propuestos en la literatura, los cuales fueron desarrollados con elementos simples, uno basado en la ley de Boyle o compresión isotérmica, y el otro en el principio de flotabilidad de Arquímedes y el error de la medición de la masa por este efecto o la masa faltante.

El método de masa faltante mostró menor dispersión en sus resultados y valores de porosidad más constantes. Por el otro lado, los resultados por el método de compresión isotérmica tienen una aparente relación con el espesor y tienden a subestimar la porosidad en comparación con el método de masa faltante.

Se encontró que el método basado en el principio de Arquímedes (masa faltante), es una alternativa que presenta una menor dispersión en los resultados en comparación con los sistemas basados en la ley de Boyle (Compresión Isotérmica), ya que cambios en la temperatura o presión no afectan los resultados, pues estas variables son tomadas en cuenta en el proceso de medición, mientras que los métodos basados en la ley de Boyle asumen una temperatura constante. Igualmente, se encontró que la precisión de estos métodos está condicionado a la relación de volúmenes entre la cámara de aire y la muestra, siendo mayor la precisión del método entre más cercano sea el volumen del material al del recipiente, pues puede causar una variación de volumen de aire y por lo tanto de la presión constante.

Si bien el método de masa faltante implica mayor precisión comparado con el sistema de Beranek, éste tiene la limitación de que requiere de una balanza analítica, la cual tiene un tope máximo de peso bajo; por lo que este método no es tan práctico para obtener la porosidad de materiales como espumas metálicas o compuestos de concreto, y el método de compresión isotérmica podría ser una alternativa para estos casos.

La dispersión de los datos según los diferentes métodos de medición, puede ser un indicador de la precisión de éstos; sin embargo, como trabajo futuro se busca reforzar estos resultados llevando a cabo un análisis estadístico más exhaustivo, el cual incluya un análisis de la varianza y el efecto de los factores en los resultados.

Referencias

- [1] P. Leclaire, O. Umnova, T. Dupont, and R. Panneton, “Acoustical properties of air-saturated porous material with periodically distributed dead-end pores,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 137, no. 4, pp. 1772–1782, 2015.
- [2] M. Rutkevičius *et al.*, “Sound absorption of porous cement composites: effects of the porosity and the pore size,” *Journal of Materials Science*, vol. 50, no. 9, pp. 3495–3503, 2015.
- [3] P. Glé, E. Gourdon, and L. Arnaud, “Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity,” *Applied Acoustics*, vol. 72, no. 5, pp. 249–259, Apr. 2011.
- [4] T. Periyaswamy, K. Balasubramanian, and C. Pastore, “Novel characterization method for fibrous materials using non-contact acoustics: Material properties revealed by ultrasonic perturbations,” *Ultrasonics*, vol. 56, pp. 361–369, 2015.
- [5] L. Beranek, “Acoustic impedance of Porous Materials*,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 13, no. 1932, pp. 248–260, 1942.

- [6] Y. Champoux, M. R. Stinson, and G. A. Daigle, “Air-based system for the measurement of porosity,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 89, no. 2, pp. 910–916, 1991.
- [7] N. Atalla, R. Panneton, F. C. Sgard, And X. Olny, “Acoustic Absorption of Macro-Perforated Porous Materials,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 243, no. 4, pp. 659–678, 2001.
- [8] P. Leclaire, O. Umnova, K. V. Horoshenkov, and L. Maillet, “Porosity measurement by comparison of air volumes,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 3 I, pp. 1366–1370, 2003.
- [9] Z. E. A. Fellah, S. Berger, W. Lauriks, C. Depollier, P. Trompette, and J. Y. Chapelon, “Ultrasonic measurement of the porosity and tortuosity of air-saturated random packings of beads,” *Journal of Applied Physics*, vol. 93, no. 11, pp. 9352–9359, 2003.
- [10] R. Panneton and E. Gros, “A missing mass method to measure the open porosity of porous solids,” in *Acta Acustica united with Acustica*, 2005, vol. 91, no. 2, pp. 342–348.
- [11] O. Umnova, K. Attenborough, H. C. Shin, and A. Cummings, “Deduction of tortuosity and porosity from acoustic reflection and transmission measurements on thick samples of rigid-porous materials,” *Applied Acoustics*, vol. 66, no. 6, pp. 607–624, 2005.
- [12] T. Dupont, P. Leclaire, and R. Panneton, “Acoustic methods for measuring the porosities of porous materials incorporating dead-end pores.,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 133, no. 4, pp. 2136–45, 2013.