

## Determinación experimental de los parámetros acústicos característicos de materiales porosos de diseño.

R. M. Rodríguez, J. Pfreztschner, C. De la Colina, A Moreno y F. Simón.  
Instituto de Acústica (CSIC), Serrano 144, 28006 Madrid

### Introducción

La implementación de modelos físico - matemáticos que describan las características de un material poroso, en función de determinados parámetros estructurales inherentes a los mismos, ha constituido un tema de preocupación para distintos aspectos de la ciencia y de la tecnología. Por una parte los acústicos se interesan en relacionar estas propiedades con la capacidad de absorción de la energía de una onda acústica incidente y demás temas relacionados, mientras que los geólogos y/o geofísicos aprovechan estas propiedades para caracterizar la geomorfología de los terrenos a través de métodos de prospección acústicos.

Entre los primeros se deben citar los trabajos de Delany y Bazley [1] sobre materiales acústicos fibrosos, en los que se puede predecir la absorción acústica del material a partir de un único parámetro: la resistividad al flujo de aire,  $\sigma$ . Este primer modelo tiene un rango limitado de aplicación comprendido entre  $10 \leq (f/\sigma) \leq 1000$ , y si bien predice con buena aproximación el comportamiento de este tipo de materiales (fibra de vidrio, lana de roca, etc.) su aplicación a materiales granulares solo ofrece tendencias de comportamiento. Hay que remitirse a otros autores, Biot [2], Attenborough [3], Stinson y Champoux [4], Allard [5], Pfreztschner et al. [6], etc., que ofrecen modelos mas elaborados y con mejores grados de aproximación en materiales de tipo granular (por ejemplo arenas), introduciendo nuevos parámetros inherentes al material, como son: la porosidad, tortuosidad, factores de forma de los poros, etc. Por tanto constituye un tema de gran interés la metrología de estos parámetros en aras de conocer su influencia en el comportamiento acústico macroscópico de un determinado material de estas características como es la granza de caucho recuperado de neumáticos de deshecho.

### Metrología de los parámetros acústicos implícitos en un material granular

La estructura de este tipo de materiales puede asimilarse a un esqueleto rígido o elástico formado por los granos del material, y en cuyos intersticios, rellenos de un fluido (aire por ej.) se propaga la onda acústica, con un proceso de degradación energética debido a fenómenos de gradiente de viscosidad y temperatura. Asociados a la forma, tamaño y tipo de conexión de los huecos intersticiales, se encuentran la definición de los parámetros profusamente utilizados en la mayoría de los modelos físicos mencionados anteriormente: porosidad,  $\Omega$ , tortuosidad,  $T$ , y resistividad al flujo de aire,  $\sigma$ .

Para la medida de estos parámetros solo existe normalizada la de la resistividad al flujo de aire [7], debiéndose implementar el resto, con otros criterios de buena práctica.

La porosidad,  $\Omega$ , para un volumen determinado del material, se define a través del cociente entre el volumen de aire contenido en las cavidades del mismo y el volumen total considerado.

La medida de esta magnitud puede determinarse mediante la utilización de una balanza de precisión, saturando el volumen muestra con un fluido determinado, conocidas las densidades del fluido y del material constitutivo. Un método alternativo cuando no se conocen dichas densidades, consiste en introducir en un recipiente con un volumen aforado, un volumen conocido del material granular enrasando con un determinado fluido hasta completar el volumen total.

En ambos procedimientos se debe tener la precaución de desgasificar el fluido para evitar la formación de burbujas en los intersticios del material, que pueden conducir a errores hasta del 20%. Ello se consigue mediante la utilización de una campana neumática ("impregnación al vacío"). Si el material granular estuviera formado por esferas con la misma dimensión, la porosidad rondaría el 38% (fácilmente calculable mediante procedimientos geométricos). Se comprende fácilmente que esta cantidad se superará en el caso de materiales con granulometría irregular en forma y tamaño, o bien, se obtendrían valores inferiores en función del grado de compactación y dispersión del tamaño de los granos.

El parámetro tortuosidad,  $T$ , está directamente relacionado con la forma de los poros y la variación de su sección recta a lo largo de su longitud, así como con la existencia de ramificaciones colaterales. Para el caso de materiales absorbentes acústicos, rígidos porosos, la teorías clásicas parten de asumir microestructuras uniformes de poros de forma cilíndrica alineados según la dirección de propagación de la onda sonora, estando relacionada la tortuosidad con el coseno al cuadrado del ángulo formado por la dirección de los ejes de los cilindros y la onda incidente normal a la superficie de la muestra.

La generalización de este concepto a poros con complicadas geometrías, implica la introducción de nuevos parámetros interrelacionados que no sólo tienen en cuenta las características estructurales del esqueleto.

En el caso real de geometrías de los poros extremadamente complejas, resulta imposible el cálculo de la tortuosidad a través de algoritmos matemáticos, por lo que se recurre a su determinación experimental. La metrología más estudiada de este parámetro, está basada en los trabajos de Brown [8] aplicados a rocas y suelos arcillosos. El método se fundamenta en la analogía existente entre propiedades acústicas y eléctricas de los materiales granulares no conductores.

Para el caso general de materiales con poros no cilíndricos, la expresión de la tortuosidad viene dada por:

$$T = \Omega \frac{r_c}{r_f} \quad (1)$$

siendo  $r_f$  y  $r_c$  las resistividades eléctricas de un fluido conductor y del material saturado con dicho fluido, respectivamente.

Un sencillo método para la obtención de estas resistividades consiste en la aplicación de un procedimiento electrolítico, midiendo la corriente que atraviesa el dispositivo en función de la tensión aplicada entre los extremos de los electrodos, para ambas situaciones: electrolito solo y material saturado con el electrolito.

En esta medida es importante la elección del fluido conductor y tipo de electrodos, para evitar que el proceso de electrólisis de lugar a la formación de nuevos compuestos químicos. Por ello se han elegido como electrodos dos placas de cobre, y como electrolito una disolución de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ). Como en el caso anterior, es de vital importancia desgasificar los volúmenes antes de proceder a la medida eléctrica.

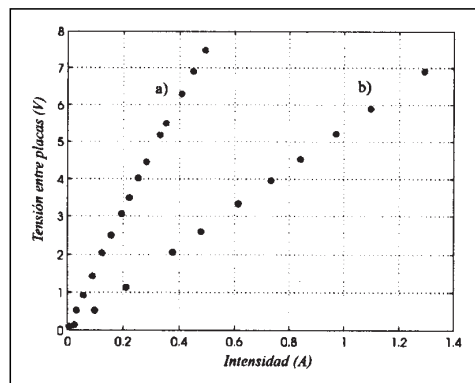


Fig.1 Resistencias electrolíticas: a) granza de caucho de granulometría 1/3 mm, saturada con una disolución al 10% de  $\text{CuSO}_4$ ; b) electrolito solo.

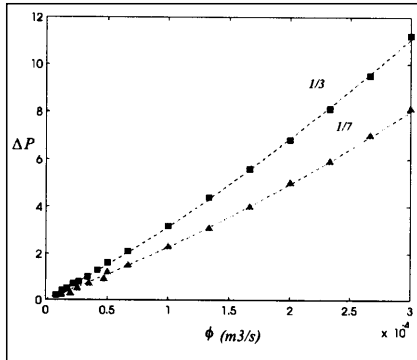


Fig 2. Variación de la presión diferencial en las muestras de granza (granulometrías 1/3 y 1/7), en función del flujo de aire

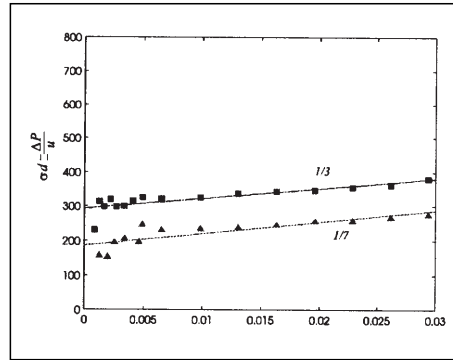


Fig.3. Variación de la resistencia específica con la velocidad del flujo de aire sobre la muestra, para las probetas de las fig.2.

Dado que en ambas determinaciones (electrolito solo y material con electrolito) los volúmenes se mantienen constantes, la expresión (1) equivale al producto de la porosidad por el cociente de las resistencias  $R_c$  y  $R_f$

Si se dispone de un generador de tensión con salida variable en amplitud, las  $R_c$  y  $R_f$  se corresponden con las pendientes de las rectas de variación de la intensidad de la intensidad eléctrica que atraviesa el electrolito, con la tensión aplicada.

En la literatura consultada, se asume la aplicación de tensión continua a las placas del electrolito; sin embargo se ha obtenido una mayor repetibilidad de las medidas, así como mejores rectas de regresión de datos experimentales, cuando la tensión aplicada es tensión alterna. A título de ejemplo, la figura 1 muestra los resultados obtenidos en la medida de las resistencias de una granza de goma con granulometría de 1/3 mm, y con una disolución del 10 % de  $\text{CuSO}_4$ . La recta de mayor pendiente corresponde a la resistencia del material saturado con el electrolito.

En función de las distintas granulometrías del material estudiado (tamaños comprendidos entre 1 y 7 mm), se han obtenido valores de la tortuosidad entre 1,2 y 3,0.

Para la medida de la resistividad al flujo de aire,  $\sigma$ , parámetro más característico de las propiedades acústicas de los materiales porosos, se ha diseñado y construido una instalación, siguiendo una de las propuestas de la norma europea EN 29053:1993. En esencia, y para un flujo continuo y calibrado de aire, proporcionado por un compresor, la determinación de  $\sigma$ , se obtiene a través de la medida de la presión diferencial,  $\Delta P$ , entre ambos lados de la muestra (presión ejercida por el flujo de aire y presión atmosférica), y el flujo de aire proporcionado por el compresor:

$$\sigma = \frac{\Delta P}{\phi} \cdot \frac{A}{d} \quad (2)$$

siendo  $A$  y  $d$  la sección y espesor de la muestra respectivamente.

La determinación de  $\sigma$  se realiza a partir de medidas simultáneas de flujos y presiones incrementales, con instrumentos debidamente calibrados.

El procedimiento de ensayo que describe la norma, exige trabajar con una velocidad lineal de flujo,  $u$ , de aire no superior a  $0,5 \times 10^{-3}$  m/s. Esto da lugar a manejar caudales de aire muy bajos, debido a que, en general, la variación lineal que establece la ecuación (2), sólo se cumple para valores pequeños de  $\phi$  (nótese que la norma se ha desarrollado específicamente para materiales porosos fibrosos, y como consecuencia, caudales altos de fluidos darían lugar a una compresión de las fibras). Por esta razón se ha diseñado y construido como medidor de flujo, un flujómetro de burbuja, capaz de medir flujos de aire del orden de  $5 \times 10^{-6}$  m³/s.

En lo relativo a las medidas de presión diferencial para un fluido continuo y estático, se pueden utilizar manómetros de agua de alta sensibilidad y/o instrumentos con sensibles transductores de presión, capaces de discriminar 0,1 Pa.

Los materiales granulares tratados, presentan muy bajas resistividades al flujo (del orden de  $10^3$  rayls MKS /m) que conllevan presiones diferenciales muy bajas del orden entre 0,2 y 14 Pa.

La figura 2 muestra los valores obtenidos de las resistencias al flujo ( $R = \Delta P / \phi$ ), para dos tipos de granza de caucho con granulometrías 1/3 mm y 1/7 mm. Puede observarse la no linealidad del comportamiento del material para flujos crecientes.

Para este tipo de materiales de muy baja resistividad al flujo de aire, la medida para flujos muy pequeños, correspondientes a velocidades de aire sobre la superficie de la muestra de  $0,5 \times 10^{-3}$  m/s, conduce a presiones diferenciales del orden de 0,15 Pa, presiones que corresponden al umbral de la mayoría de este tipo de instrumentos. Consciente de esta limitación, la mencionada norma, aconseja realizar una extrapolación lineal de los valores de la resistencia específica ( $R_s = \Delta P \cdot A / \phi$ ), para el valor de la velocidad anteriormente mencionada.

La figura 3 muestra las rectas de regresión de la resistencia específica en función de la velocidad de flujo, a partir de los datos experimentales obtenidos y representados en la figura 2. De estas rectas se puede obtener la resistencia específica  $R_s = \sigma d$ , según norma, para una  $u = 0,5 \times 10^{-4}$  m/s, y calcular  $\sigma$  de cada material conocido el espesor de las probetas.

### Conclusiones

El estudio empírico de las variaciones de las magnitudes físicas intrínsecas asociadas a los materiales acústicos porosos absorbentes con estructura granular (resistividad al flujo, porosidad, tortuosidad) con la forma y tamaño de los poros, permite inducir a través de modelos físico - matemáticos apropiados, el comportamiento del material acústico resultante, de forma que pueden establecerse relaciones reversibles entre éstos y el modelo, con objeto de optimizar las propiedades acústicas del material granular conformado.

En este trabajo se resalta el interés de la puesta a punto de métodos experimentales para la determinación de las mencionadas magnitudes, métodos que en general son difíciles de implementar, y en el que se refleja la experiencia adquirida, proponiendo metodologías que conducen a resultados satisfactorios para la medición de la porosidad, tortuosidad y resistividad al flujo de aire.

### Bibliografía

- [1] M.E. Delany y E.N. Bazley. Acoustic properties of fibrous absorbent materials. Applied Acoustics, 3 (1970).
- [2] M.A. Biot, The theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I Low frequency range. II Higher frequency range. J. Acoust. Soc. Amer., 28 (1956), pp. 168-91.
- [3] K. Attenborough. Acoustical characteristics of rigid porous absorbents and granular materials. J. Acoust. Soc. Amer, 73 (3) March 1983.
- [4] R. Stinson y Y. Champoux. On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. J. Acoust. Soc. Amer. 92 (2) Aug. (1992).
- [5] J.F. Allard, Propagation of sound in porous media. Elsevier, London, 1993
- [6] J. Pfitzschner, et al. Estudio teórico - experimental de materiales granulares absorbentes preparados con granza de caucho. Tecniacústica 97.
- [7] Norma EN 29053:1993. Materiales para aplicaciones acústicas. Determinación de la resistencia al flujo de aire..
- [8] Brown, R.J.S., Connection between formation factor of electrical resistivity and fluid-solid coupling factor in Biot's equation for acoustic waves in fluid-filled porous media. Geophysics, 45 (1980) 1269-75.

### Reconocimientos

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación AMB 95-0101 del Plan Nacional de I+D, DGICYT.