

## CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES INTRÍNSECAS ACÚSTICAS DE MATERIALES POROSOS MEDIANTE MÉTODOS INDIRECTOS

PACS: 43.55.EV

González Ganso, Jose Andrés<sup>1</sup>; Cesteros Morante, Beatriz<sup>2</sup>; Cordero Izquierdo, Roberto<sup>3</sup>  
Fundación CIDAUT  
Parque tecnológico de Boecillo, P.209.  
47151 Boecillo. Valladolid. España  
Tel. +34 983 548 035  
Fax: +34 983 548 062  
E-mail: [josgong@cidaut.es](mailto:josgong@cidaut.es)<sup>1</sup>; [beaces@cidaut.es](mailto:beaces@cidaut.es)<sup>2</sup>; [robcor@cidaut.es](mailto:robcor@cidaut.es)<sup>3</sup>

### ABSTRACT

Nowadays is very important to predict the acoustic behaviour of enclosures, in the sector of the transport, as well as in construction, due to the users demands and the existent normative. By means of vibro-acoustic simulation, starting from the intrinsic properties (porosity, resistivity, tortuosity, Young modulus, density,...) and the geometry of the enclosure, extrinsic properties as the acoustic absorption, acoustic isolation,... can be calculated.

In this article an indirect method is described, based on Johnson-Champoux-Allard equations and experimental measures of acoustic absorption, for the determination of the acoustic intrinsic properties of porous materials.

### RESUMEN

Hoy en día es muy importante predecir el comportamiento acústico de recintos, tanto en el sector del transporte, como de la construcción, debido a las exigencias de los usuarios y de las normativas existentes. Mediante la simulación vibroacústica, a partir de las propiedades intrínsecas (porosidad, resistividad, tortuosidad, módulo de Young, densidad,...) y la geometría del recinto se pueden calcular propiedades extrínsecas como la absorción acústica, aislamiento acústico,...

En este artículo se describe un método indirecto, basado en las ecuaciones de Johnson-Champoux-Allard y medidas experimentales de absorción acústica, para la determinación de las propiedades intrínsecas acústicas de materiales porosos.

### 1. INTRODUCCIÓN

En el sector del automóvil al igual que otros mercados, como el de la construcción, el usuario demanda cada vez con mayor insistencia productos más confortables. Una de las prestaciones que contribuye de manera importante al confort interior es la ausencia de ruidos que molesten a los usuarios o les impidan participar de una conversación. Cada vez más los coches incorporan nuevos elementos que aíslan el habitáculo de las fuentes de ruido exterior (motor,

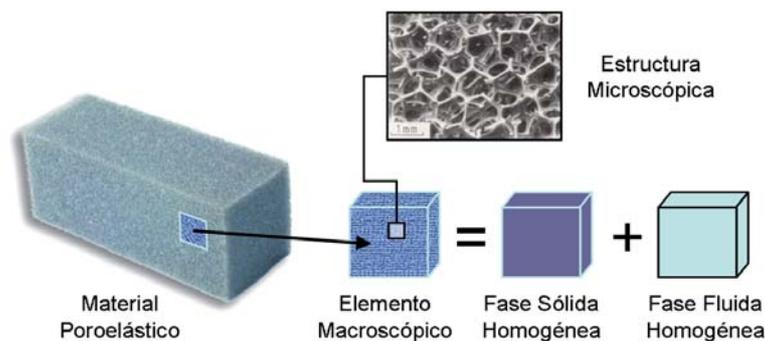
rodadura, aerodinámica) así como otros que acondicionan el interior para permitir un entorno acústico adecuado.

Este trabajo describe una metodología de caracterización de materiales para el diseño de elementos que permitan satisfacer las prestaciones acústicas globales del automóvil. Se presentará como se pueden caracterizar las propiedades intrínsecas que describen el comportamiento acústico del material. A partir de estas propiedades se está en condiciones de diseñar un material multicapa, mediante simulación, capaz de satisfacer los requerimientos acústicos del elemento o pieza a introducir en el habitáculo del vehículo.

## 2. MATERIALES

Todo material tiene unas características únicas e individuales que lo definen como tal, y si bien estos son clasificados en grupos y subgrupos por similitudes macroscópicas, ningún material es idénticamente igual a otro en cuanto a la estructura microscópica. Los materiales de los que están compuestos los insonorizantes se pueden dividir en dos tipos: sólidos (compuestos por una fase sólida) y porosos (tiene una fase sólida y una fase fluida).

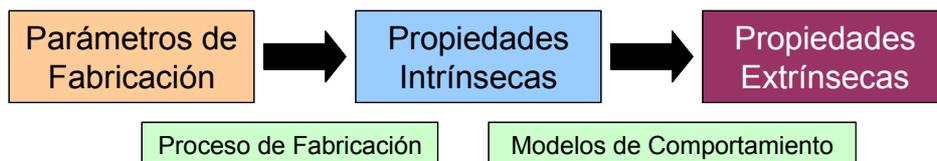
El comportamiento vibroacústico de los materiales (aislamiento, absorción acústica,...) está determinado por su estructura microscópica, pero debido a su complejidad, ya que la estructura microscópica no es homogénea, los materiales se estudiarán en base a su estructura macroscópica (homogénea).



Esta estructura macroscópica puede caracterizarse por parámetros intrínsecos (no dependen del espesor del material, ni de la frecuencia) que se relacionan con las propiedades acústicas extrínsecas del material (coeficiente de absorción acústica, aislamiento acústico,...) por medio de modelos matemáticos de comportamiento.

Las propiedades intrínsecas del material están condicionadas por los parámetros de fabricación (proporciones entre los diferentes componentes que conforman el material, método de fabricación, etc.).

La relación entre los parámetros de fabricación y las propiedades estructurales se determina por la medición de las propiedades estructurales para diferentes muestras, obtenidas modificando parámetros de fabricación de forma aislada (por ejemplo, la densidad) y observando así la sensibilidad de cada parámetro estructural con la fabricación.



El fin en el diseño de materiales acústicos, insonorizantes, es poder conseguir las propiedades extrínsecas acústicas exigidas por el cliente mediante el control de los parámetros iniciales de fabricación. Para conseguirlo debemos seguir el gráfico de la figura en sentido inverso. No sólo es importante la relación entre cada tipo de variable, sino el conocer cuáles de las variables

que podemos controlar (parámetros de fabricación) tienen realmente un efecto destacable sobre las propiedades finales.

En los materiales porosos se producen tres tipos de transmisión de ondas (en el caso de materiales sólidos sólo las dos primeras):

- Compresión del marco estructural: Ondas longitudinales vibratorias.
- Cortante del marco estructural: Ondas de flexión vibratorias.
- Compresión del fluido en el material: Ondas longitudinales acústicas.

El comportamiento de estos tipos de ondas en los materiales porosos está condicionado por 14 propiedades:

- Propiedades del fluido (5):
  - Densidad del fluido,  $\rho_0$
  - Velocidad del sonido en el fluido,  $c_0$
  - Viscosidad cinemática,  $\nu_0$
  - Constante adiabática,  $\gamma$
  - Número de Prandtl,  $B^2$
- Propiedades estructurales mecánicas del material (4), poroso o no:
  - Densidad másica,  $\rho$
  - Modulo de Young,  $E$
  - Coeficiente de Poisson,  $\nu$
  - Loss factor,  $\eta$
- Propiedades estructurales acústicas del material poroso (5):
  - Resistividad al flujo estático de aire,  $\sigma$
  - Porosidad,  $\phi$
  - Tortuosidad,  $\alpha_\infty$
  - Longitud característica viscosa,  $\Lambda$
  - Longitud característica térmica,  $\Lambda'$

### 3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES

#### 3.1. Propiedades del Fluido

Las propiedades que afectan al fluido son fácilmente extraíbles de fórmulas matemáticas y ábacos a partir de la presión ( $P_0$ ) y la temperatura ( $T_0$ ) a las que se realizan las medidas. A continuación se muestran las ecuaciones que definen las cinco propiedades del fluido para el caso particular de que sea un gas ideal:

Densidad del fluido, $\rho_0$ (R es la constante específica de los gases):	$\rho_0 = \frac{P_0}{R \cdot T_0}$
Velocidad del sonido en el fluido, $c_0$ :	$c_0 = \sqrt{\frac{P_0}{\gamma \cdot \rho_0}}$
Viscosidad cinemática del fluido, $\nu_0$ ( $\mu$ es la viscosidad dinámica):	$\nu_0 = \frac{\mu}{\rho_0}$
Constante adiabática del fluido, $\gamma$ ( $C_p$ el calor específico a presión constante y $C_v$ el calor específico a volumen constante):	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$
Número de Prandtl del fluido, $B^2$ ( $\kappa$ es el coef. de conductividad térmica):	$\gamma = \frac{c_p \cdot \mu}{\kappa}$

### 3.2. Propiedades estructurales mecánicas del material

Las propiedades estructurales mecánicas, dado que los cálculos se realizan en el rango elástico, son: la densidad másica,  $\rho$ , el módulo de Young,  $E$ , el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , y el loss factor,  $\eta$ . Estas propiedades se obtienen por medio de ensayos de caracterización: ensayo ASTM E756/98 [2] y el ensayo de masa-muelle-amortiguador para la determinación de las propiedades en función de la frecuencia y el ensayo ASTM E8 - UNE/EN ISO 527, que es un ensayo de tipo cuasiestático.

### 3.3. Propiedades estructurales acústicas del material

Por último, las propiedades estructurales acústicas del material que determinan como se comporta el aire en interior del material. Por lo tanto, este tipo de caracterización, solo se puede realizar a materiales porosos, pues son los que tienen una parte sólida y otra fluida.

Los materiales porosos se pueden clasificar según su comportamiento en: porosos elásticos, porosos ligeros, porosos rígidos y modelos de Delany-Bazley (materiales altamente porosos) [3]. Las ecuaciones de Biot gobiernan la propagación de ondas de acoplamiento elástico (compresión y cortante) y ondas acústicas de compresión. A continuación se muestran las ecuaciones elásticas de la fase sólida y la ecuación Helmholtz para la fase fluida:

$$\begin{aligned} \mu u_{i,jj} + (\tilde{\lambda} + \mu) u_{j,ij} + \omega^2 \tilde{\rho}_s u_i &= -\tilde{\gamma} p_{,i} \\ \frac{1}{\omega^2 \tilde{\rho}_f} p_{,ii} + \frac{1}{\tilde{K}_f} p &= \tilde{\gamma} u_{i,i} \end{aligned}$$

Siendo:

- u: Vector desplazamiento macroscópico de la fase sólida
- p: Presión macroscópica de la fase fluida
- $\lambda, \mu$ : Coeficientes de Lamé de la fase sólida
- $\tilde{K}_f$ : Módulo de Bulk efectivo de la fase fluida
- $\tilde{\rho}_s$ : Densidad efectiva de la fase sólida
- $\tilde{\rho}_f$ : Densidad efectiva de la fase fluida
- $\tilde{\gamma}$ : Coeficiente de acoplamiento entre la fase fluida y sólida
- $\sim$ : Variable compleja

Estos parámetros de Biot se obtienen a partir de propiedades estructurales acústicas y mecánicas macroscópicas promedio (que son las que queremos determinar).

A continuación se definen las propiedades estructurales acústicas de los materiales porosos:

a) La resistividad al flujo estático de aire,  $\sigma$ , en Rayls/m o N·s/m<sup>4</sup>, expresa el retraso por fricción, es decir, la resistencia al flujo de aire cuasi-estático a través de los poros del material. Si  $\Delta p$  es la variación de presión,  $\Delta x$  es el camino recorrido y  $v$  es el flujo de aire por unidad de área, la resistividad estática al flujo de aire se define como:

$$\sigma = \frac{1}{v} \frac{\Delta p}{\Delta x} \quad \sigma > 0$$

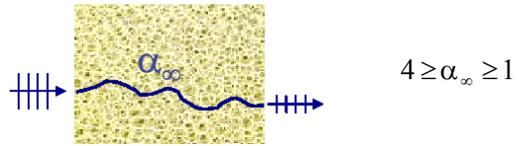
Nos da una idea de la disipación viscosa del sonido. La resistividad estática al flujo de aire de materiales acústicos varía mucho, el rango de valores típico está entre 1E3 y 1E7 Rayls/m.

b) La porosidad,  $\phi$ , (adimensional): es la fracción de volumen de material ocupada por aire. Si  $V_{\text{fluido}}$  es el volumen de aire (que no está encerrado dentro de las celdas del material) y  $V_{\text{material}}$  es el volumen total del material poroso, se define la porosidad como:

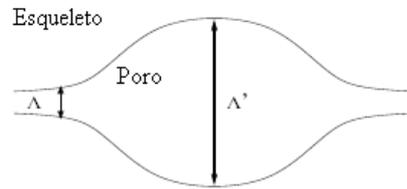
$$\phi = \frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{material}}} \quad 1 > \phi > 0$$

La porosidad de materiales acústicos típicos, tales como las espumas y la fibra de vidrio, normalmente es muy alta, mayor de 0.9, y en general mayor que 0.98.

c) La tortuosidad,  $\alpha_{\infty}$ , (adimensional): es una medida geométrica de la desviación entre el camino seguido por la onda acústica y el camino directo (espesor) y es equivalente al factor estructural ( $k_s$ ). Está relacionada con la resistencia eléctrica de un material poroso no conductor saturado con un electrolito.



d) La longitud característica viscosa,  $\Lambda$ , en  $\mu\text{m}$ : es la dimensión macroscópica promedio de las celdas relacionadas con las pérdidas viscosas o el radio promedio de los poros más pequeños del material.



$$\Lambda' \geq \Lambda$$

e) La longitud característica térmica,  $\Lambda'$ , en  $\mu\text{m}$ : Es la dimensión macroscópica promedio de las celdas relacionadas con las pérdidas térmicas o el radio promedio de los poros más grandes del material.

$$\frac{1}{3.3} \left( \frac{8\alpha_{\infty}\eta}{\sigma\phi} \right)^{1/2} \leq (\Lambda, \Lambda') \leq \left( \frac{8\alpha_{\infty}\eta}{\sigma\phi} \right)^{1/2}$$

Cada una de las cinco variables tiene un método experimental de medida, en algunos casos muy complejo, sin embargo, existe un método indirecto para la medida de estas propiedades. El método de cálculo indirecto consiste en primer lugar en medir con un tubo de impedancias según la norma ISO 10534-2 [2] o ASTM E1050 la impedancia acústica superficial, el coeficiente de absorción y reflexión en función de la frecuencia de muestras del mismo material monocapa (no materiales multicapa) pero de distintos espesores. En segundo lugar, mediante el programa CARAM (CARacterización Acústica de Materiales), desarrollado en CIDAUT, se calculan las propiedades estructurales acústicas (porosidad, resistividad, tortuosidad, longitud característica viscosa y térmica).



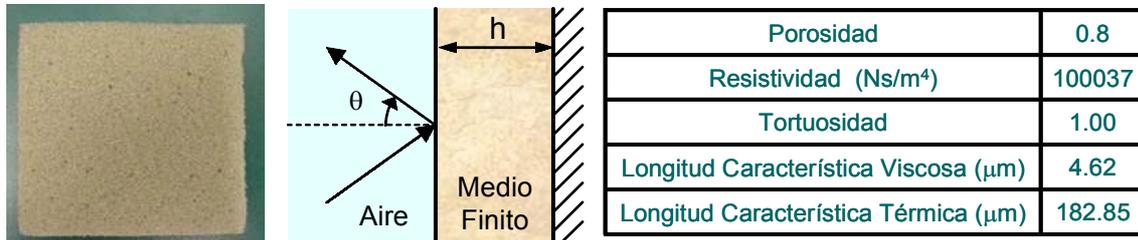
Este programa consiste en la minimización de funciones basadas en las ecuaciones del modelo acústico de fluido equivalente de Johnson-Champoux-Allard (derivadas de las Ec. de Biot) a partir de las propiedades extrínsecas acústicas obtenidas con el tubo de impedancias además de la presión y temperatura a las que se realizaron las medidas experimentales.

La función objetivo a minimizar para obtener es ( $\mathbf{a}=\{\sigma, \phi, \alpha_{\infty}, \Lambda, \Lambda'\}$ ):

$$\chi^2(\mathbf{a}) = \sum_{i=1}^N \left[ (\alpha_i - \alpha(\omega_i; \mathbf{a}))_{h_1}^2 + (\alpha_i - \alpha(\omega_i; \mathbf{a}))_{h_2}^2 \right]$$

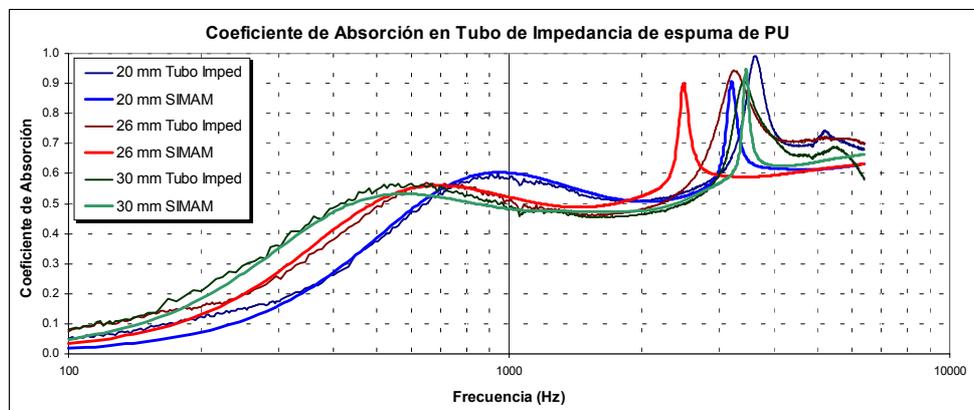
El programa varía los valores de las propiedades intrínsecas acústicas hasta que la absorción acústica obtenida por simulación,  $\alpha(\omega, a)$ , sea similar a la experimental,  $\alpha_i$ , para cada frecuencia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para una espuma rígida de poliuretano:



Una vez obtenidas las propiedades estructurales mecánicas y acústicas, se pueden llevar a cabo las simulaciones acústicas mediante programas de elementos finitos o de contorno o el SIMAM, SIMulación Acústica de materiales Multicapa. Este programa, desarrollado en CIDAUT, realiza una resolución analítica mediante el método de las matrices de transferencia a partir de modelos matemáticos de comportamiento de materiales basados en las ecuaciones de Biot [1]. Este programa permite introducir diferentes tipos de materiales (porosos, sólidos y fluidos), distintas configuraciones de capas de materiales, espesores, ángulos de incidencia,... Las hipótesis en las que se basa este programa son: resolución de problemas bidimensionales (materiales con dimensiones laterales infinitas), las capas del material son homogéneas e isotrópicas transversalmente y la onda de incidencia es plana (con un ángulo de incidencia cualquiera, incluso campo difuso).

Si se representan los valores del coeficiente de absorción experimental (obtenido con el tubo de impedancias) y el simulado para los valores de las propiedades acústicas para varios espesores, comprobamos que las curvas se ajustan y por tanto las propiedades son válidas



#### 4. CONCLUSIONES

En este artículo se muestra la metodología para la caracterización de las propiedades intrínsecas de los materiales mediante un método indirecto que utiliza las medidas de absorción acústica en un tubo de impedancia y el programa CARAM basado en las ecuaciones de Johnson-Champoux-Allard. Gracias a estas propiedades se pueden llevar a cabo simulaciones vibroacústicas de materiales que nos permitan predecir el comportamiento de multicapas

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Propagation of Sound in Porous Media. J.F. Allard. Elsevier Applied Science (1993)
- [2] ASTM E756/98: Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials.
- [3] Delany M. E. & Bazley E. N., "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials". Applied Acoustics 3, 1970.