

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LA ABSORCIÓN ACÚSTICA

El sonido se absorbe por diferentes mecanismos, siendo el más importante la conversión de la energía acústica en calor por disipación visco-térmica. Aunque esta disipación se produce incluso en el aire, es cuantitativamente mucho más importante en el seno de materiales especialmente diseñados para ello, denominados materiales acústicos. Estos materiales se suelen disponer recubriendo la superficie interior de divisorios o de placas. Se habla entonces de absorbentes superficiales. En algunas ocasiones, se disponen de manera que toda su superficie esté en contacto con el campo sonoro, actuando entonces como absorbentes volúmicos (Ingard, 1999).

Históricamente, el interés por los materiales acústicos surgió en los años 30, en el contexto del estudio de la reverberación en recintos, aunque los aspectos fundamentales de la absorción sonora ya habían sido tratados en el libro de Teoría del Sonido de Lord Rayleigh a finales del siglo XIX (Ingard, 1999). Desde entonces han aparecido libros dedicados exclusivamente a la absorción sonora, como el de Zwicker y Kosten (1954), el de Allard (1993), el de Ingard (1999), o la versión más actualizada de Allard y Atalla (2009). Otros libros incluyen capítulos dedicados al tema, como el de Beranek y Ver (1992), el de Bies y Hansen (1996), el de Fahy (2001), el de Mechel (2002), o el de Cox y D'Antonio (2004). Además, se han publicado cientos de artículos en revistas especializadas. Ingard (1999) incluye una revisión de los trabajos más importantes publicados hasta 1999.

Hay aspectos interesantes de la absorción sonora que no se encuentra en los libros anteriormente citados. El objetivo fundamental de este libro es incidir sobre estos aspectos. Estos incluyen: materiales sostenibles (Asdrubali *et al.*, 2013), paneles micro-perforados sencillos y múltiples (Maa, 1987; 1998), o sistemas absorbentes híbridos pasivo-activos (Cobo *et al.*, 2003; 2004). Además de estos, se incluyen otros temas ya desarrollados en otros libros, como la absorción en el aire, la absorción por materiales porosos, el efecto del suelo en la propagación del sonido (Attenborough *et al.*, 2007), o los métodos de medida del coeficiente de absorción. Más que profundizar en los aspectos teóricos de la absorción del sonido en estos materiales, muy bien tratados en otros libros y artículos, en este libro se pondrá el énfasis en el diseño óptimo de un sistema absorbente para una banda de frecuencias dada.

1.2. MATERIALES ABSORBENTES

Los dispositivos absorbentes son aquellos susceptibles de producir una absorción del sonido alta. Según Colina y Moreno (2005), los materiales absorbentes se pueden clasificar en:

- materiales porosos
 - de esqueleto rígido
 - de esqueleto flexible
- resonadores
 - simples
 - ✓ de Helmholtz
 - ✓ de membrana
 - membranas propias
 - tipo Bekesy
 - acoplados
 - ✓ en serie
 - ✓ en paralelo: paneles perforados
- materiales mixtos: combinación de los anteriores, constituyen la mayor parte de los materiales comerciales
- materiales anecoicos: de variación gradual de las características por variación real o por configuración geométrica

Los materiales porosos están constituidos por un esqueleto, que puede ser rígido o flexible, en cuyo seno existen cavidades, más o menos tortuosas, rellenas de aire. Los materiales porosos de esqueleto rígido proporcionan, en general, una absorción mayor que los de esqueleto flexible, por encima de una cierta frecuencia. Los de esqueleto flexible tienen picos de resonancia, y son susceptibles de proporcionar mayor absorción en baja frecuencia (figura 1.1).

Los poros pueden ser abiertos o cerrados (figura 1.2). Los materiales de poro abierto absorben más que los de poro cerrado. Según Arenas y Crocker (2010), los materiales porosos pueden ser celulares (por ejemplo, las espumas), fibrosos (por ejemplo, las lanas minerales), o granulares (por ejemplo, las granzas de caucho). Los materiales celulares se pueden modelar mediante una réplica volumétrica de células cúbicas con tubos de conexión, los materiales fibrosos mediante tubos cilíndricos paralelos, y los materiales granulares mediante esferas apiladas.

En los absorbentes tipo resonador, la absorción se produce por el bien conocido efecto de resonancia de Helmholtz. Proporcionan una curva de absorción de banda estrecha alrededor de una frecuencia que depende del volumen de la cavidad y de la longitud y sección del cuello del resonador. Los paneles microperforados pueden ser considerados como una distribución de resonadores, compartiendo todos ellos la misma cavidad de aire. Su banda de absorción es, por tanto, más ancha que la de un solo resonador. Para ensanchar aun más la banda de frecuencias de absorción de un sistema microperforado, se pueden disponer diferentes capas de ellos (sistemas multicapa).

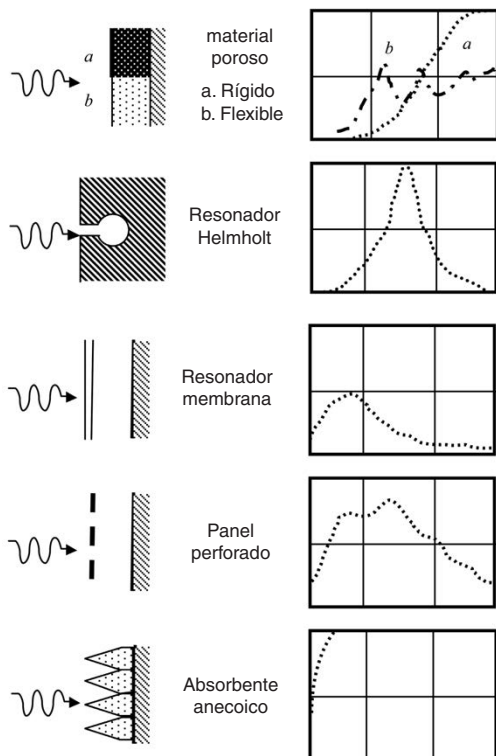


Figura 1.1. Curvas de absorción típicas de algunos materiales absorbentes (Según Colina y Moreno, 2005).

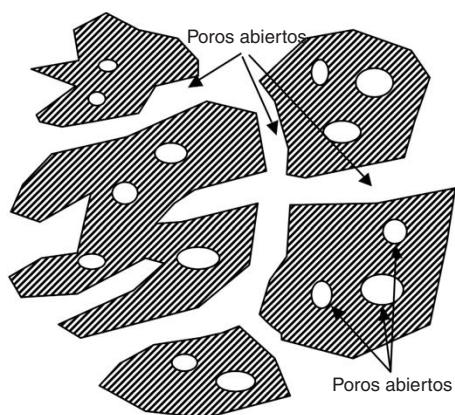


Figura 1.2. Poros abiertos y cerrados en un material absorbente.

La propagación del sonido en un medio consiste en variaciones de la presión hidrostática de equilibrio a que está sometido dicho medio. En un medio homogéneo, esta propagación se hace con pérdidas de energía (absorción) muy pequeñas, excepto a distancias muy grandes y frecuencias muy altas. Un medio poroso se caracteriza por una cierta microestructura, donde existen al menos dos fases: la fase sólida, o esqueleto rígido o flexible, y la parte gaseosa, el aire que rellena los poros. La propagación de una onda acústica a través de un medio poroso da lugar a procesos viscosos y térmicos que degradan la energía acústica en calor.

La viscosidad regula la transición de la velocidad desde cero (sobre la superficie del esqueleto) hasta la velocidad en campo libre. La distancia de transición entre ambas velocidades se denomina *capa límite viscosa* (figura 1.3a). La viscosidad es la responsable de que el perfil de velocidad de partículas sea cero en las paredes y máximo en el centro (figura 1.3b).

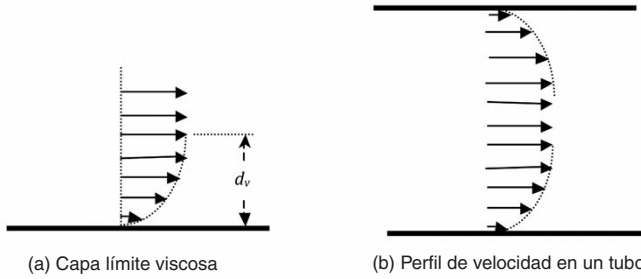


Figura 1.3. (a) Capa límite viscosa y (b) perfil de velocidad en un tubo.

El espesor de la capa límite viscosa, d_v , es (Ingard, 1999):

$$d_v = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega}} \approx \frac{0.22}{\sqrt{f}} \text{ (cm)}, \quad (1.1)$$

donde η es la viscosidad dinámica del aire, ρ_0 la densidad del aire, y $\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular. Así pues, el espesor de la capa límite viscosa es inversamente proporcional a la frecuencia. Para una frecuencia de $f = 100$ Hz, la capa límite viscosa tiene un espesor aproximado de $d_v = 220 \mu\text{m}$, mientras que para $f = 1000$ Hz, $d_v = 70 \mu\text{m}$.

Un modelo muy simplificado de un material fibroso sería una serie de tubos paralelos, figura 1.4. De hecho, Rayleigh ilustraba la absorción sonora estudiando la propagación del sonido en un tubo cilíndrico. La resistencia al flujo, definida como la caída de presión acústica entre las dos caras del cilindro, dividida por la velocidad de partículas media en el mismo, es (Ingard, 1999)

$$\sigma = \frac{8\eta}{a^2} = \frac{32\eta}{d^2}, \quad (1.2)$$

siendo $d=2a$ el diámetro del cilindro. La resistividad al flujo de un tubo cilíndrico es inversamente proporcional al diámetro del cilindro (al tamaño de los poros, en un material fibroso).

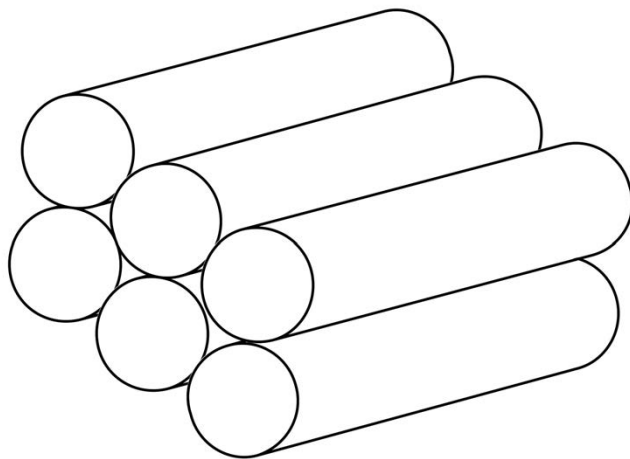


Figura 1.4. Un material fibroso modelado como una serie de tubos paralelos.

Así pues, la magnitud de los efectos viscosos depende de la frecuencia y de la microestructura de los poros.

Las pérdidas térmicas también contribuyen a disipar energía del campo acústico. Una onda acústica que se propaga en un medio libre produce una fluctuación de temperatura isentrópica (adiabática) entre las zonas de compresión (temperatura más alta) y las de rarefacción (temperatura más baja). Sin embargo, en un medio poroso, la conductividad térmica de la parte rígida (el esqueleto) es mucho mayor que la de la parte gaseosa (el aire). Esto hace que las fluctuaciones de temperatura cerca de las paredes del esqueleto rígido sean isotermas. La transición desde la condición isoterma cerca de las paredes, hasta la adiabática lejos de ellas, origina una capa límite térmica, con su correspondiente espesor, d_t . Según Ingard (1999), el espesor de la capa límite térmica es

$$d_t = \sqrt{\frac{\kappa}{\eta C_p}} d_v \approx \frac{0.25}{\sqrt{f}}, \quad (1.3)$$

donde κ es el coeficiente de conductividad térmica del aire, y C_p es el calor específico a presión constante del aire. Así pues, el espesor de la capa límite térmica es del mismo orden que el de la viscosa, y también disminuye con la frecuencia.

La estructura de la figura 1.4, aunque bastante simple, es capaz de predecir el comportamiento más elemental de un material poroso. Las estructuras tubulares dan

lugar a una resistividad, que depende del diámetro de los tubos y de la frecuencia, como consecuencia de la cual hay unas pérdidas visco-térmicas de energía acústica. Existen modelos más sofisticados que tienen en cuenta otros parámetros constitutivos del material, como la porosidad, la tortuosidad, factores de forma, etc. En cualquier caso, la característica acústica más importante de un material absorbente es su curva de absorción como una función de la frecuencia.

El coeficiente de absorción de un absorbente superficial se puede predecir si se conoce la impedancia de entrada al sistema. Dicha impedancia de entrada depende de la impedancia acústica compleja del material, de su constante de propagación compleja, y de su espesor. Los modelos de propagación a través de los materiales absorbentes proporcionan estas variables acústicas, que resultan ser funciones de sus parámetros constitutivos (resistividad al flujo, porosidad, tortuosidad, etc.). El objetivo fundamental de este libro es analizar los modelos que proporcionan las variables acústicas de los materiales absorbentes a partir de sus parámetros constitutivos, enfatizando su uso para el diseño óptimo de un sistema absorbente en una determinada banda de frecuencias.

1.3. ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

La absorción del sonido en el aire tiene una gran importancia en problemas de propagación a distancias grandes y altas frecuencias. En el capítulo 2 se revisará este tema, prestando especial atención a la Norma ISO 9623-1 (1993). Esta Norma nos proporciona una fórmula que permite obtener la atenuación del sonido por absorción como una función de la distancia y del coeficiente de absorción del aire, que depende esencialmente de las condiciones atmosféricas.

El coeficiente de absorción depende, además de la frecuencia y de los parámetros constitutivos del material, del ángulo de incidencia sobre su superficie. En el capítulo 3 se definirán los diferentes coeficientes de absorción de interés en aplicaciones de control de ruido. En concreto, el coeficiente de absorción para incidencia normal, α_0 , y el coeficiente de absorción bajo incidencia oblicua para un absorbente de reacción local, α_1 , o de reacción volumétrica, α_2 . Integrando sobre el ángulo de incidencia se obtiene el coeficiente de absorción para incidencia difusa, α_d , que equivale al coeficiente de absorción Sabine, α_s , de un recinto.

En el capítulo 4 se revisan algunos de los modelos de materiales absorbentes porosos. En concreto, los modelos semi-empíricos que proporcionan la impedancia compleja y la constante de propagación compleja como una función del parámetro del absorbente $E=\rho af/\sigma$, con especial atención a los modelos de Delany y Bazley (1970) y de Allard y Champoux (1992), y los modelos semi-fenomenológicos, como el de fluido equivalente, o Johnson-Champoux-Allard (Allard, 1993; Allard y Atalla, 2009), que requiere, además de la resistividad al flujo, la porosidad, la tortuosidad, y las longitudes características viscosa y térmica. Ya que el coeficiente de absorción de estos sistemas depende de varios parámetros, puede resultar útil representarlo gráficamente como una función de un par de variables adimensionales que agrupen a varios de dichos parámetros. Se obtienen así las cartas de diseño del material absorbente (Mechel, 1980).

Algunos de los materiales acústicos más usados son susceptibles de desprender partículas que pueden producir irritación de la piel y, si son inhaladas, se pueden depositar en los alveolos pulmonares. En los últimos años han surgido muchos materiales porosos, susceptibles de proporcionar absorción, pero que son fabricados a partir de materiales naturales (fibras de algodón, fibras de coco, fibras de lino, fibras de caña de bambú, etc.) o reciclados (granza de caucho obtenida de los neumáticos fuera de uso). En el capítulo 5 se revisan los modelos que permiten predecir el comportamiento de estos materiales sostenibles como absorbentes sonoros.

Los absorbentes basados en resonadores de Helmholtz son unos de los más usados en acústica de la edificación. Como tienen una banda de absorción muy estrecha, se usan fundamentalmente para absorber tonos puros de baja frecuencia. En el capítulo 6 se revisan los modelos que permiten predecir la curva de absorción de sistemas basados en resonadores de Helmholtz.

El absorbente acústico que más se parece al modelo elemental esbozado en la figura 1.4 es el basado en paneles microperforados (MPP). Un absorbente MPP consta de un panel con perforaciones de diámetro d , distribuidas sobre un panel de espesor t , con un porcentaje de perforación ϕ , enfrente de una pared rígida, dejando una cavidad de aire de espesor D . Este sistema proporciona una curva de absorción sintonizable en función de los parámetros constitutivos (d, t, ϕ, D). Para predecir su coeficiente de absorción se pueden usar los modelos de Maa (1987; 1998) o fluido equivalente (Atalla y Sgard, 2007). En el capítulo 7 se analizarán estos modelos.

La curva de absorción que se puede conseguir con un sistema MPP sencillo tiene un ancho máximo de unas dos octavas. Para ensanchar la curva de absorción se pueden usar sistemas de dos MPPs (DL-MPP) o tres MPPs (TL-MPP). En el capítulo 8 se analizan los modelos que permiten obtener el coeficiente de absorción de estos absorbentes multicapa. También se estudia en este capítulo un diseño híbrido, que combina una capa porosa con dos MPPs (el DL-MPP/P), capaz de producir absorción en hasta cinco octavas.

El diseño de un sistema MPP multicapa óptimo es bastante complicado, ya que requiere la sintonización de $4N$ parámetros, siendo N el número de capas. Por ejemplo, la sintonización de un DL-MPP (TL-MPP) requiere el ajuste de 8 (12) parámetros. Para facilitar el diseño óptimo de un sistema MPP multicapa se propone en el capítulo 9 un procedimiento de optimización basado en el recocido simulado.

Los modelos de predicción del coeficiente de absorción propuestos en los capítulos 3-9 están basados todos en un modelo de propagación de onda plana. En los estudios de propagación sonora encima del suelo se usa, sin embargo, un modelo de ondas esféricas (Attenborough *et al.*, 2007). El coeficiente de reflexión de onda esférica contiene, además del coeficiente de reflexión de onda plana, un término denominado *onda de tierra*. Por lo demás, el coeficiente de reflexión de onda plana se obtiene a partir de la impedancia de entrada al suelo. Como en los capítulos 3-9, esta impedancia de entrada se puede predecir si se conoce la impedancia compleja y la constante de propagación compleja del suelo (para suelos homogéneos) o de cada una de sus capas (para suelos estratificados). En el capítulo 10 se presentan los modelos que permiten predecir el efecto del suelo en la propagación del sonido en espacios abiertos.

Con cualquiera de los diseños estudiados en los capítulos 3-5 y 7-8 se puede conseguir una curva de absorción con un pico por encima de los 500-600 Hz y un espesor limitado. Si se quiere extender la curva de absorción a frecuencias más bajas es menester incrementar el espesor considerablemente. En la mayor parte de las aplicaciones, la solución ocupa tanto espacio que no es práctica. En este margen de las frecuencias bajas se pueden usar sistemas híbridos pasivo-activos que combinan las prestaciones de la parte pasiva a frecuencias medias y altas, con las de la parte activa a frecuencias bajas (Cobo *et al.*, 2003, 2004). En el capítulo 11 se revisan los fundamentos del funcionamiento del diseño de estos sistemas híbridos, así como su optimización en una determinada banda de frecuencias.

Por último, en el capítulo 12 se revisan los diferentes métodos de medida del coeficiente de absorción en incidencia normal (tubo de impedancias), incidencia oblicua (método de reflexión), y en campo difuso (cámara reverberante).

1.4. REFERENCIAS

- ALLARD, J. F. y CHAMPOUX, Y. (1992). «New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials». *J. Acoust. Soc. Am.*, 91: 3346-3353.
- ALLARD, J. P. (1993). *Propagation of Sound in Porous Media. Modelling sound absorbing materials*. Elsevier Applied Science, London.
- ALLARD, J. P. y ATALLA, N. (2009). *Propagation of Sound in Porous Media. Modelling sound absorbing materials. Second Edition*. John Wiley & Sons, Chichester.
- ATALLA, N. y SGARD, J. F., (2007). «Modeling of perforated plates and screens using rigid frame porous models». *J. Sound Vib.*, 303: 195-208.
- ARENAS, J. P. y CROCKER, M. J. (2010). «Recent trends in porous sound-absorbing materials». *Sound & Vibration*, July 2010: 12-17.
- ASDRUBALI, F., SCHIAVONI, S. y HOROSHENKOV, K. V. (2013). «A review of sustainable materials for acoustic applications». *Building Acoustics*, 19: 283-312.
- ATTENBOROUGH, K., LI, K. M. y HOROSHENKOV, K., (2007). *Predicting Outdoor Sound*. Taylor & Francis, London.
- BERANEK, L. L. y VER, I. L., (1992). *Noise and Vibration Control Engineering. Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New York.
- BIES, D. A. y HANSEN, C.H., (1996). *Engineering Noise Control. Theory and Practice*. E&FN Spon, Londres.
- COBO, P., FERNÁNDEZ, A., y DOUTRES, O. (2003). «Low frequency absorption using a two-layer system with active control of input impedance». *J. Acoust. Soc. Am.*, 114: 3211-3216.
- COBO, P., PFRETSZCHNER, J., CUESTA, M., y ANTHONY, D. K. (2004). «Hybrid passive-active absorption using microperforated panels». *J. Acoust. Soc. Am.*, 116: 2118-2125.
- COLINA, C. de la y MORENO, A., (2005). *Acústica de la Edificación*. Fundación Escuela de la Edificación, Madrid.
- COX, T. J. y d'ANTONIO, P. (2004). *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application*. Spon Press, New York.

- FAHY, F., (2001). *Foundations of Engineering Acoustics*. Academic Press, San Diego.
- INGARD, U. 1999. *Notes in Sound Absorption*. Kitteri Point, Maine.
- ISO 9613-1 (1993). *Acoustics- Attenuation of sound during propagation. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. The International Standardization Organization, Geneve.
- MAA, D. Y., (1987). «Microperforated-panel wideband absorbers». *Noise Control Eng. J.*, 29: 77-84.
- MAA, D. Y., (1998). «Potential of microperforated panel absorber». *J. Acoust. Soc. Am.*, 104: 2861-2866.
- MECHEL, F. P. (1988). «Design charts for sound absorber layers». *J. Acoust. Soc. Am.*, 83: 1002-1013.
- MECHEL, F. P., (2002). *Formulas of Acoustics*. Springer, Berlín.
- ZWIKKER, C. y KOSTEN, C. W., (1949). *Sound Absorption Materials*. Elsevier, New York.