

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN A INCIDENCIA NORMAL DE ESPUMAS DE ALUMINIO DE PORO ABIERTO FABRICADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE INFILTRACIÓN

PACS: 43.55.Ev

M. A. Navacerrada¹, P. Fernández², C. Díaz¹ y A. Pedrero¹

¹Grupo de Acústica Arquitectónica, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid
Avda. Juan de Herrera 4, 28040 Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Teléfono 91 336 42 49, Fax 91 336 65 54

²Instituto de Energía, Materiales y Medio Ambiente, Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia), Telefax: 57 (4) 3544532

Abstract

Depending on the connectivity between the pores, the metallic foams can classify in closed-cell and open-cell foams. The majority of metallic foams in the market are closed-cell aluminium foams. However, for some applications are more appropriated the open-cell aluminium foams. In this work, we analyze the absorption coefficient measured in the impedance tube of open-cell aluminium foams fabricated by means the infiltration technique. These foams are characterized by a very homogeneous structure and by a high absorption coefficient at low frequencies when they are backed by an air gap.

Resumen

Dependiendo de la conexión entre sus poros, las espumas metálicas se clasifican en espumas de poro abierto o poro cerrado. La mayoría de las espumas que se comercializan actualmente son espumas de poro cerrado. Sin embargo, para algunas aplicaciones son más apropiadas las espumas de poro abierto. En este trabajo, se estudia el coeficiente de absorción en tubo de impedancia de espumas de aluminio de poro abierto fabricadas mediante el proceso de infiltración. Estas espumas se caracterizan por una estructura muy homogénea y por un elevado valor del coeficiente de absorción a bajas frecuencias cuando se combinan con una cámara de aire.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la estructura de los materiales en relación con sus propiedades está permitiendo el desarrollo de materiales y equipos con, cada vez, más altas prestaciones tecnológicas. Los materiales metálicos porosos, principalmente las espumas de aluminio, han experimentado un desarrollo mucho más lento y no ha sido, sino hasta hace pocos años, en que el desarrollo de nuevos procesos de fabricación y la obtención de productos de propiedades relativamente homogéneas y coste razonable ha permitido disponer, industrialmente, de estos nuevos materiales [1].

Las espumas de aluminio se dividen en dos tipos, de poro cerrado, si los poros están aislados unos de otros y de poro abierto si los poros están conectados entre sí. Las espumas de aluminio de poro cerrado se caracterizan por tener una gran rigidez y pueden obtenerse por

inyección directa de gases en el metal fundido [2], [3]. Por otro lado, la fabricación de espumas de poro abierto está principalmente basada en la utilización de materiales de relleno que luego son eliminados fácilmente [4]. Actualmente, la mayoría de las espumas de aluminio del mercado son espumas de poro cerrado fabricadas por distintos métodos. Algunos de estos métodos tienen un elevado coste de producción o son difícilmente controlables, lo que da lugar a espumas de propiedades no reproducibles. Las propiedades de las espumas de aluminio están directamente ligadas a su composición química, morfología y densidad relativa. La principal ventaja de estos materiales son presentar unas propiedades notablemente diferentes a las de las aleaciones metálicas originales. Esto las hace muy atractivas para la fabricación de nuevos productos y el desarrollo de nuevas aplicaciones. Además, debido a la gran variedad de productos disponibles, obtenidos por métodos de fabricación muy distintos, las propiedades presentan una gran variabilidad.

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la estructura porosa sobre la conductividad térmica y sobre el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal de espumas de aluminio de poro abierto fabricadas mediante la técnica de infiltración. Desde el punto de vista de las aplicaciones de estos materiales es interesante responder a preguntas sobre si existe o no una forma y diámetro óptimos de poro, cuál es el espesor más apropiado para la espuma o para la cámara de aire que se puede combinar con ella. Todos estos factores, la forma y el tamaño del poro, el espesor y el método de montaje afectan claramente a los valores de la propiedad física medida.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. FABRICACIÓN DE LAS ESPUMAS DE ALUMINIO DE PORO ABIERTO

Para la fabricación de las espumas de aluminio de poro abierto se ha seguido el siguiente proceso:

1) elaboración del molde de partículas de sal común, NaCl. El tamaño de las partículas de NaCl se selecciona de acuerdo con el tamaño de los poros de la espuma que se desea fabricar. En este trabajo, el NaCl ha sido tamizado para obtener partículas de 2, 1 y 0,5 mm de diámetro para la fabricación de los diferentes moldes,

2) a continuación el molde se rellena con el aluminio fundido en condiciones de vacío y a una temperatura de 700 ° C. El material empleado para la fabricación de la espuma ha sido AlSiMg reciclado, y

3) finalmente el compuesto Al/NaCl resultante es mecanizado en forma de cilindros de tamaño diferente según el test al que vaya a ser sometida la espuma. Posteriormente la sal se elimina simplemente por disolución en agua destilada dejando libre la estructura porosa de la espuma de aluminio.

La estructura de la espuma de aluminio es una replicación del molde inicial de las partículas de sal. La estructura de las espumas de aluminio ha sido examinada mediante microscopía óptica y de barrido [5]. Las medidas muestran que las espumas de aluminio fabricadas presentan poros abiertos bien conectados y uniformemente distribuidos. La porosidad de las espumas de aluminio oscila entre el 64 y el 66 % [4, 5]. En la Figura 1 se muestra una fotografía de espumas de aluminio de los tres diámetros de poro fabricados. En el trabajo se han usado tres espesores diferentes: 10, 20 y 45 mm.



Figura 1. Fotografía de espumas de cada uno de los tres tipos de diámetro de poro fabricadas.

2.2. MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN SONORA

El coeficiente de absorción sonora a incidencia normal de las espumas de aluminio se ha medido en un tubo de impedancia Modelo 4206 con dos micrófonos Modelo 4186 de Bruel&Kjaer según la norma ISO 10534-2: 1988 "Acoustics determination of sound absorption coefficient and impedance or admittance by the impedance tube. Part II: Transfer function method". Se ha usado un analizador Pulse 3560 C para procesar la señal utilizando la aplicación Material Testing. Para generar la señal en el tubo de impedancia se ha utilizado el analizador Pulse y un amplificador Pioneer A-305 R. Para medir el coeficiente de absorción acústica en todo el rango de frecuencias son necesarias dos configuraciones de medida. En la primera el tubo se cierra con una muestra de 100 mm de diámetro y permite la medida del coeficiente de absorción sonora a incidencia normal en un rango de frecuencias comprendido entre 50 y 1660 Hz. En la segunda configuración, el tubo se cierra con una muestra de 29 mm de diámetro y permite la medida del coeficiente de absorción entre 500 y 6400 Hz.

La medida en el tubo de impedancia o tubo de Kundt es rápida y se utiliza sobre todo en el proceso de diseño de un material. Para la medida del coeficiente de absorción las muestras deben prepararse con el diámetro exacto del tubo para no dejar cámaras de aire que puedan alterar la medida. El montaje de la muestra es un factor crítico. Por todo ello, se han caracterizado entre dos y tres muestras de cada tipo de espuma y se ha calculado el coeficiente de absorción como un promedio de todas las medidas realizadas. Además todos los ensayos se repitieron en dos fechas diferentes para comprobar su reproducibilidad.

2.3. MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La medida de la conductividad térmica de las espumas de aluminio se ha llevado a cabo en una caja térmica. En cada una de las paredes de la caja térmica existe una abertura cuadrada, tal y como se muestra en la Figura 2, en la que se fijan las láminas de los materiales cuya conductividad térmica se quiere determinar. Dentro de la caja térmica se encuentra una caja negra en cuyo interior hay una bombilla de 100 W que sirve para elevar la temperatura del interior de la caja hasta unos 50° C. La bombilla se encuentra en el interior de la caja negra para reducir los efectos de calentamiento por radiación. La medida de las distintas temperaturas se realiza con termopares. Dos termopares se colocan en el interior de la caja térmica, uno de ellos para medir la temperatura interior de la caja y el otro para la medida de la temperatura de la pared interior del material. Otros dos termopares en el exterior sirven para la medida de la temperatura de la pared exterior del material y de la temperatura ambiente. La medida de las temperaturas se realiza transcurridas unas 5 horas desde el inicio del proceso de calentamiento, cuando las lecturas de los termopares son estables para garantizar que el sistema está condiciones próximas al régimen estacionario.

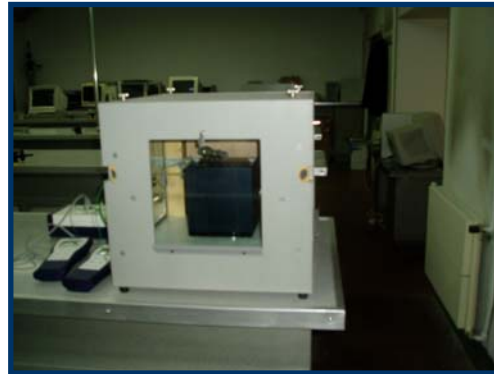


Figura 2. Caja térmica para la medida de la conductividad térmica.

El intercambio de calor entre dos sistemas puede ser debido a tres posibles mecanismos: conducción, convección y radiación. En el caso de una lámina de material homogénea y de espesor inferior a 5 cm podemos considerar que los fenómenos que participan en el proceso de transferencia de calor son fundamentalmente los mecanismos de conducción y convección. En régimen estacionario y considerando el flujo unidireccional las expresiones de la ley de Fourier para los mecanismos de conducción y convección son las siguientes:

Convección aire-pared interior del material: $\Phi = h_{\text{int}} \cdot S \cdot (t_1 - t_2)$ (1) siendo h_{int} el coeficiente de convección del aire interior, t_1 la temperatura del aire interior y t_2 la temperatura de la pared interior del material.

Conducción a través de la pared del material: $\Phi = k \cdot S \cdot \frac{(t_2 - t_3)}{d}$ (2) siendo k la conductividad térmica del material y t_3 la temperatura de la pared exterior del material.

Convección aire-pared exterior del material: $\Phi = h_{\text{ext}} \cdot S \cdot (t_3 - t_4)$ (3) siendo h_{ext} el coeficiente de convección del aire exterior y t_4 la temperatura del aire exterior.

A partir de las medidas de las distintas temperaturas y con estas tres ecuaciones se determina la conductividad térmica k del material. Usando un valor de $8.1 \frac{W}{K \cdot m^2}$ para h_{int} y h_{ext} tal y como recomienda el fabricante del equipo de las ecuaciones (1) y (3) se determina un valor promedio del cociente $\frac{\Phi}{S}$. Conocido el valor de $\frac{\Phi}{S}$, k se obtiene de la ecuación (2). Aunque este método no sigue las especificaciones de la normativa que describe la medida del coeficiente de conductividad térmica es un método fiable con un error menor del 10 %.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

3.1. PROPIEDADES TÉRMICAS

En la Figura 3 se han representado los valores medidos para la conductividad térmica de las espumas de aluminio en función del diámetro de poro: la conductividad aumenta con el diámetro de poro. Para la representación se ha elegido el diámetro de poro en lugar de la porosidad, como suele ser habitual, porque dado que la porosidad de todas las espumas

fabricadas es muy similar se considera que el diámetro de poro es el parámetro fundamental que fija su comportamiento. Los valores medidos para la conductividad térmica están en el orden de magnitud de los publicados en la literatura [6].

En las espumas de aluminio, la conductividad térmica medida es una combinación de la conductividad térmica del aluminio y del aire. El flujo de calor que se transporta por conducción en el sólido se reduce cuando disminuye la fracción de volumen de sólido presente, por tanto cuando aumenta la porosidad: si se reduce la sección transversal del sólido el flujo de calor encontrará mayor resistencia. Esta resistencia aumenta aún más si los poros tienen formas tortuosas. Los resultados que se muestran en la Figura 3 confirman estos resultados indicando que no solo la porosidad sino también el diámetro de poro es un parámetro a tener en cuenta en el análisis del comportamiento de la conductividad térmica. Esta dependencia puede estar relacionada con el hecho de que la resistencia térmica es mayor cuanto menor sean las dimensiones de los canales. De este modo, aunque la porosidad es muy similar, la conductividad térmica efectiva es menor en las espumas de 0,5 mm de diámetro de poro.

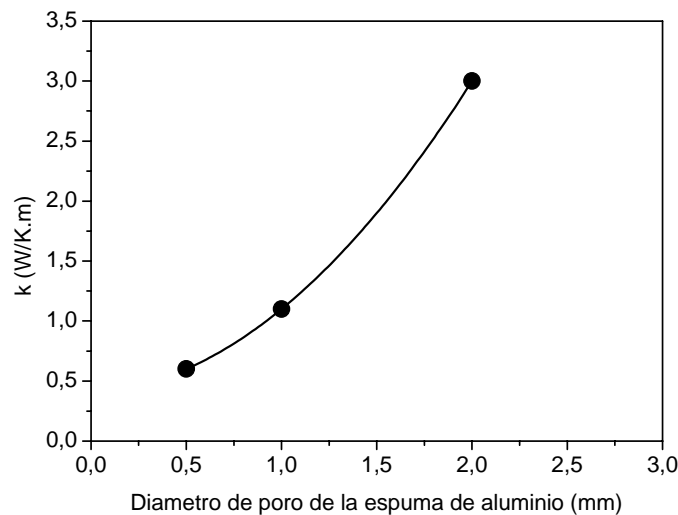


Figura 3. Conductividad térmica medida para las espumas de aluminio en función de su diámetro de poro.

En la literatura puede encontrarse un extenso trabajo de modelización de la conductividad térmica de las espumas metálicas [6,7] pero pocos datos se han publicado relativos específicamente a su dependencia con el diámetro de poro. Algunas simulaciones muestran que la conductividad térmica disminuye con el diámetro de poro cuando la porosidad es mayor del 60 %, mientras que para porosidades menores no hay un efecto significativo del diámetro de poro. En cualquier caso, el comportamiento mostrado en la Figura 3 es similar al encontrado para la permeabilidad hidráulica K de las espumas. Esta magnitud también se ve afectada por el tamaño de poro disminuyendo también su valor cuando disminuye el tamaño de poro [4, 5].

3.2. PROPIEDADES ACÚSTICAS

En relación a las propiedades acústicas, en la Figura 4 para un espesor de 20 mm y para los tres diámetros de poro fabricados se ha representado el coeficiente de absorción sonora a incidencia normal medido en el tubo de impedancia. Las espumas de aluminio con el menor diámetro de poro exhiben los valores más altos del coeficiente de absorción: la espuma de aluminio de 0,5 mm de diámetro de poro presenta la curva de absorción de la Figura 5 con el máximo pico de absorción sonora más alto y ancho. Este comportamiento ha sido observado

para todas las espumas de aluminio fabricadas con este diámetro de poro independientemente de su espesor. De nuevo, teniendo en cuenta que todas las espumas de aluminio fabricadas presentan valores muy similares de la porosidad, este comportamiento se atribuye al diámetro de poro de la espuma.

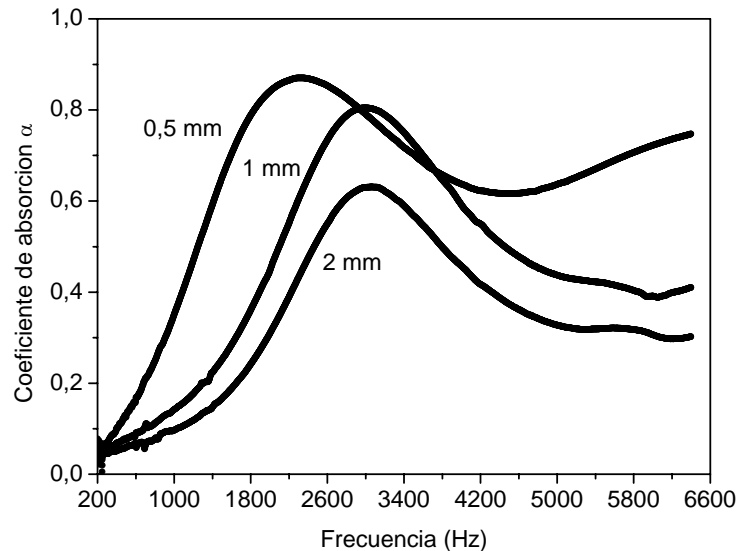


Figura 4. Coeficiente de absorción sonora a incidencia normal para un espesor de las espumas de aluminio de 20 mm y diámetro de poro de 0,5, 1 y 2 mm. El diámetro de poro se ha indicado junto a cada curva del coeficiente de absorción sonora medido.

La absorción de energía sonora en materiales porosos se debe principalmente a dos mecanismos: disipación de energía sonora debido a la propagación en un medio viscoso y la disipación de energía debido al rozamiento con las paredes del interior de un tubo delgado o cavidad. Cuando la onda sonora penetra dentro del material la amplitud de la vibración de las moléculas de aire se amortigua progresivamente debido a la fricción o rozamiento con la superficie de las cavidades. Si la cavidad tiene un diámetro pequeño, esto supone una mayor resistencia y por tanto una mayor disipación de la energía de la onda sonora, resultando una mayor absorción. En general, parece que el coeficiente de absorción sonora es en estos materiales fundamentalmente dependiente de la contribución de este efecto. Simulaciones llevadas a cabo con metales porosos de diámetro de poro comprendido entre 0,5 y 5 mm indican que la contribución de este efecto aumenta cuando aumenta la frecuencia y cuando disminuye el diámetro de poro [8].

Si se aumenta el espesor de la espuma de aluminio aumenta su capacidad de absorción sonora: un mayor espesor significa una mayor superficie sobre la cual existe rozamiento. En la Figura 5, se ha representado la posición del máximo pico de absorción sonora en función del espesor para los tres diámetros de poro fabricados. Las espumas de aluminio, como en general todos los materiales porosos de estructura rígida, presentan bajos valores del coeficiente de absorción a bajas frecuencias cuando detrás de ellos se coloca directamente una superficie rígida, como son las condiciones en que se lleva a cabo la medida en el tubo de impedancia. Una posibilidad de mejorar la absorción sonora a baja frecuencia es introducir una cámara de aire entre el material y la superficie rígida. Cuando detrás de la espuma de aluminio se coloca una cámara de aire, el máximo pico de absorción sonora se desplaza a bajas frecuencias. Este desplazamiento depende del espesor de la cámara de aire. En la Tabla I, para algunas espumas fabricadas, se indican la posición del pico de máxima absorción sonora y su valor del coeficiente de absorción. Es importante señalar que en algunos

casos el desplazamiento del máximo pico de absorción sonora se produce hasta frecuencias inferiores a los 300 Hz.

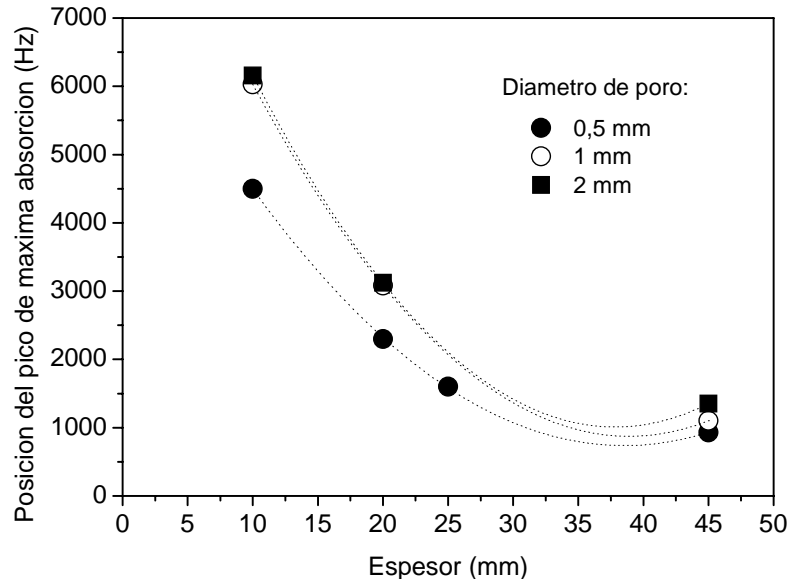


Figura 5. Posición del máximo pico de absorción sonora en función del espesor para las espumas de aluminio de los tres diámetros de poro fabricados.

Espesor de la espuma (mm)	Diámetro de poro (mm)	Espesor cámara de aire (cm)	Absorción del pico de máxima absorción sonora	Posición de pico medida (Hz)	Posición de pico calculada (Hz)
45	2	5	0,80	571	540
10	1	2	0,74	1600	1594
45	1	10	0,99	333	319
45	0,5	10	0,90	290	250
45	0,5	5	0,90	400	340
45	0,5	2	0,92	580	540

Tabla I. Medida y estimación mediante la expresión (4) de las características de la frecuencia de resonancia (valor de absorción y posición del pico de máxima absorción sonora) de varias espumas de aluminio fabricadas.

Cuando las espumas de poro abierto se combinan con una cámara de aire el mecanismo de disipación de energía sonora pasa a ser fundamentalmente descrito por el comportamiento de un resonador de Helmholtz. La frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz se calcula mediante la siguiente expresión [9]:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{LV}} \quad (4)$$

donde c es la velocidad del sonido, A es la sección del cuello, L es la longitud del cuello más $0,8\sqrt{A}$ y V es el volumen de la cavidad. En las espumas de aluminio de poro abierto, la combinación de cada poro con la cámara de aire puede considerarse como un resonador de Helmholtz donde el cuello lo constituye el poro y la cavidad del resonador la cámara de aire. En la Tabla I para cada espuma se ha incluido también la posición del pico de máxima absorción calculada sustituyendo los correspondientes valores del resonador en la expresión (4). Las pequeñas discrepancias entre los valores medidos y los calculados se deben a la existencia en cada muestra de numerosos canales con diferentes longitudes. Por ello, la posición del máximo pico de absorción se extiende a un pico ancho debido a la existencia de un amplio número de resonadores de dimensiones diferentes.

4. CONCLUSIONES

Los recientes avances técnicos han hecho posible la existencia en el mercado de una gran variedad de espumas de aluminio con un amplio intervalo de composiciones y propiedades siendo, cada una de ellas, adecuada para una aplicación concreta.

Hemos analizado las propiedades térmicas y acústicas de las espumas de aluminio de poro abierto fabricadas mediante la técnica de infiltración. Las ventajas de estas espumas de aluminio es que el precio de fabricación es relativamente bajo y se consigue una estructura homogénea. Por otro lado, si además se usa una matriz de aluminio reciclado conduce a un proceso de fabricación aún más económico sin detrimento de sus propiedades físicas.

La medida de la conductividad térmica y del coeficiente de absorción sonora a incidencia normal en espumas de aluminio de similar porosidad ha servido para poner de manifiesto la importancia del diámetro de poro sobre las propiedades del material. En particular, el análisis de las propiedades acústicas revela que este material posee un considerable potencial para aplicaciones como absorbentes sonoros. Una ventaja de estos materiales comparados con otros materiales acústicos como poliéster o lanas minerales es que se trata de un material ecológico y reciclable.

5. REFERENCIAS

- [1] J. A. Gutiérrez y J. Oñoro, Espumas de aluminio. Fabricación, propiedades y aplicaciones, Revista de Metalurgia 44 (5), 457-476, 2008.
- [2] M. A. Navacerrada, C. Díaz, A. Pedrero y L. E. García, Absorción acústica de espumas de aluminio; Materiales de Construcción, vol. 58 (291), p. 85-98, 2008
- [3] M. A. Navacerrada, C. Díaz, A. Pedrero y L. E. García, Espumas de aluminio para control acústico en construcción; Actas de las II Jornadas de Investigación en Construcción, ISBN: 978-84-7292-367-6, p. 276, 2008.
- [4] P. Fernández, J. Cruz, M. A. Navacerrada, C. Díaz, L. E. García y R. Drew, Mechanical and functional properties related to porous structure of recycled aluminium, Proceedings of 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams (METFOAM09), 2009.
- [5] P. Fernández, L. L. Cruz, L. E. García, C. Díaz y M. A. Navacerrada, Sound absorption properties of aluminium sponges manufactured by infiltration process, Advanced Materials Research 146-147, 1651-1654 (2010). ISSN 978-3-03785-061-9.
- [6] E. Sadeghi, S. Hsieh y M. Bahrami, Thermal conductivity and contact resistance of metal foams, J. Phys. D: Appl. Phys. 44 (2011) 125406 (7pp).
- [7] Thermal conductivity and noise attenuation in aluminium foams, Saira Amjad, Wolfson College, University of Cambridge, Thesis, October 2011.
- [8] F. Han, G. Seiffert, Y. Zhao y B. Gibbs, Acoustic absorption behaviour of a open-celled aluminium foam, J. Phys. D: Appl. Phys. 36 (2003) 294-302.
- [9] J. D. Irwin y E. R. Graf, Industrial noise and vibration control (Englewood Cliffs: Prentice-Hall 1979).