

ABSORCIÓN DE METAMATERIALES EN ESTRUCTURA PERIÓDICA

PACS: 43.55.Dt

Zahonero Iñesta, Daniel
dBcover Solutions
Av. Benelux 91
Elda. España
E-mail: daniel.z@dbcover.de

Palabras Clave: Absorption Metamaterial, Periodic Structure Absorption, Symmetrical Absorption, Shaped Absorption Panel, Sound Conditioning, Sound Absorption.

ABSTRACT

Nowadays, Absorbent elements are rarely considered in the previous stage of the projects. It leaves limited or no room for its installation in case of necessary corrections. Thus, maximizing the performance per installation surface is crucial. On the other side, limitations in construction and installation such fire behaviour, VOC`s emissions or harmlessness require combination of different materials in a unique solution: Absorbent Meta-materials. The study presents the improvement in absorption of sound-absorbent metamaterials arranged in bi-dimensional periodic structures compared to the shape-less solution.

RESUMEN

En la actualidad, los elementos absorbentes no suelen ser considerados en el proyecto inicial, lo que hace que el espacio destinado a su colocación sea limitado. Por ello es fundamental maximizar el rendimiento por unidad de superficie. Por otro lado, limitaciones de construcción e instalación como resistencia al fuego, minimización de VOCs o inocuidad, hacen necesaria la combinación de diferentes materiales en una única solución: Metamateriales absorbentes. El estudio presenta la mejora de la absorción de metamateriales fonoabsorbentes dispuestos en estructura periódica bi-dimensional frente al rendimiento de los mismos materiales que los componen en plano (sin forma ni periodicidad).

INTRODUCCIÓN

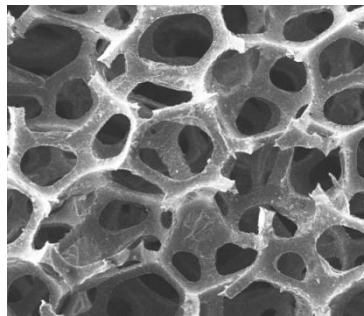
Cada vez es más importante el confort acústico en los espacios habitables tanto públicos como privados. Uno de los factores más importantes para conseguirlo es a través un tiempo de reverberación adecuado. Para ello, es necesario una correcta combinación entre geometría de la sala, superficies no reflectantes, elementos de decoración y mobiliario que permitan reducir las reflexiones. En el caso de que no sean suficiente, es necesario ajustar la absorción mediante elementos fonoabsorbentes.

En numerosos casos, estos elementos absorbentes no suelen ser considerados en el proyecto inicial, lo que hace que el espacio destinado a su colocación sea limitado. Por ello es fundamental maximizar el rendimiento por unidad de superficie. Actualmente no hay ningún material perfecto que por sí solo tenga las características que maximicen la fonoabsorción. Para cada rango de frecuencias el fenómeno de absorción es controlado por propiedades distintas del material. Además, las limitaciones de construcción e instalación como resistencia al fuego, minimización de VOCs o inocuidad, hacen necesaria la combinación de diferentes materiales en una única solución: **Metamateriales absorbentes**.

MATERIALES

A la hora de definir el Metamaterial óptimo para la absorción en todo el rango de frecuencias, se ha de combinar materiales que su configuración les permita trabajar sin anular sus propiedades ventajosas.

Según estudios, los materiales porosos muestran un gran rendimiento de absorción a medias y altas frecuencias [1]. Estos están basados en celdas interconectadas y son comúnmente conocidos como espumas.



Estructura Microscópica de la Espuma de resina Melamínica (Absorbente)

Su impedancia viene definida por la impedancia característica y la constante de propagación:

$$Z_{\text{espuma}} = Z \cosh(\Gamma \cdot d)$$

donde d es el espesor del material. La constante de propagación y la impedancia característica pueden ser modeladas por medio de coeficientes siguiendo métodos específicos para espumas [2]:

$$Z = \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[C_5 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{r}\right)^{-C_6} \right] + j \left(\frac{2\pi f}{c_0}\right) \left[1 + C_7 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{r}\right)^{-C_8} \right]$$

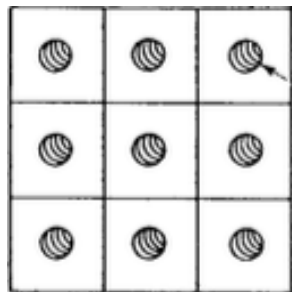
$$\Gamma = \rho_0 c_0 \left[1 + C_1 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{r}\right)^{-C_2} \right] - \rho_0 c_0 \left[C_3 \left(\frac{\rho_0 \cdot f}{r}\right)^{-C_4} \right]$$

Donde se observa que el rendimiento viene definido por la resistencia al flujo del material (r) y aumenta con la frecuencia. En el caso de este estudio, la espuma utilizada tiene una resistencia al flujo media [3] ($r \approx 10$ kPa s/m²) que proporciona gran rendimiento en absorción. Resistencias al flujo demasiado bajas ($r \leq 0.5$ kPa s/m²) apenas interactúan con el aire de la onda sonora disipando energía. Por otro lado, resistencias al flujo muy altas no dejan al aire penetrar en el material reflejando gran parte de la energía ($r \geq 100$ kPa s/m²).

Finalmente, la absorción a bajas frecuencias está relacionada con el espesor final del material. Se ha demostrado que la absorción oscila de forma periódica entre un valor máximo y mínimo. Los máximos se encuentran en las frecuencias cuya longitud de onda es 4 veces el espesor[4]:

$$d = (2n + 1) \lambda / 4$$

Sin embargo, por las limitaciones de diseño e instalación, se ha utilizado el fenómeno de superficies vibrantes. La energía es transmitida a la membrana, que a la vez de radiar la energía vibracional hacia el interior del absorbente, parte es disipada por el tejido no rígido. Esta membrana ha de ser permeable al flujo de aire para permitir que el absorbente interno pueda trabajar correctamente a medias y altas frecuencias.



Estructura Microscópica del Tejido (Membrana)

Modelando el tejido como una membrana perforada, la impedancia viene dada por [5]:

$$Z_{tex} = \frac{1}{\pi a^2} \rho_0 \sqrt{2\omega\mu} \left[\frac{t}{a} + 2 \left(1 - \frac{A_h}{A_b} \right) \right] + jw \frac{\rho_0}{\pi a^2} \left[t + 1.7a \left(1 - \frac{a}{b} \right) \right]$$

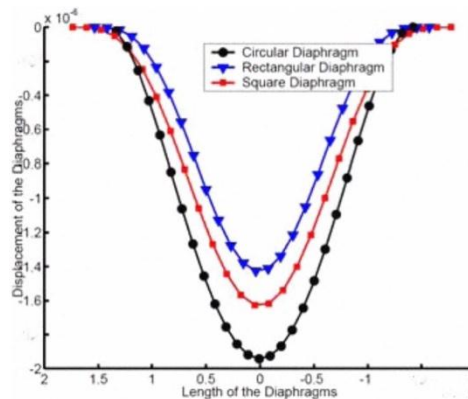
Con lo que podemos regular el comportamiento del absorbente en función del espesor del tejido (t), el tamaño de la separación de hilos (a) y el grosor del hilo (b-2a). Entendiendo el comportamiento de dicha impedancia, y las limitaciones de fabricación, se ha utilizado un tejido que alcanza un máximo en a=0.4mm y b=1.2mm, con un espesor de t=2mm.

Otro factor limitante para la selección de materiales básicos que conformen un metamaterial absorbente de alto rendimiento es su comportamiento frente al fuego. Las soluciones para acústica de salas realizan su función de manera óptima al estar expuestos al ruido, lo que significa que su aplicación está directamente al alcance de los usuarios que estén en el recinto. Por ello, los materiales además de ser inocuos y no provocar ninguna reacción que pueda contaminar el aire del ambiente, han de ser resistentes al fuego en caso de un eventual incendio.

Para el estudio, por su resistencia al fuego, sus propiedades elásticas y valores de resistencia al flujo son la Espuma de Melamina como absorbente y tejido ignífugo de Poliéster.

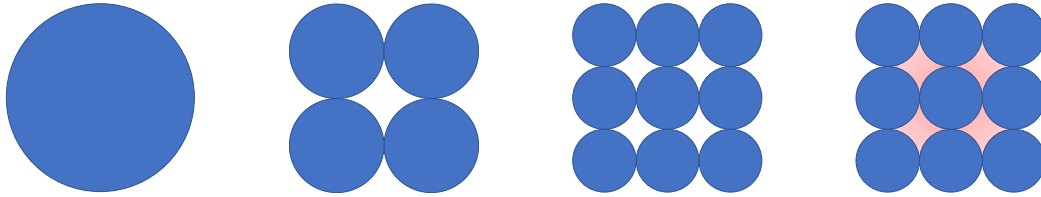
CONFIGURACIÓN

Para mejorar el rendimiento a bajas frecuencias, se ha de optimizar el efecto membrana. Para ello se ha de conseguir una forma geométrica que genere la resonancia del modo fundamental con la mayor deflexión posible [6]:

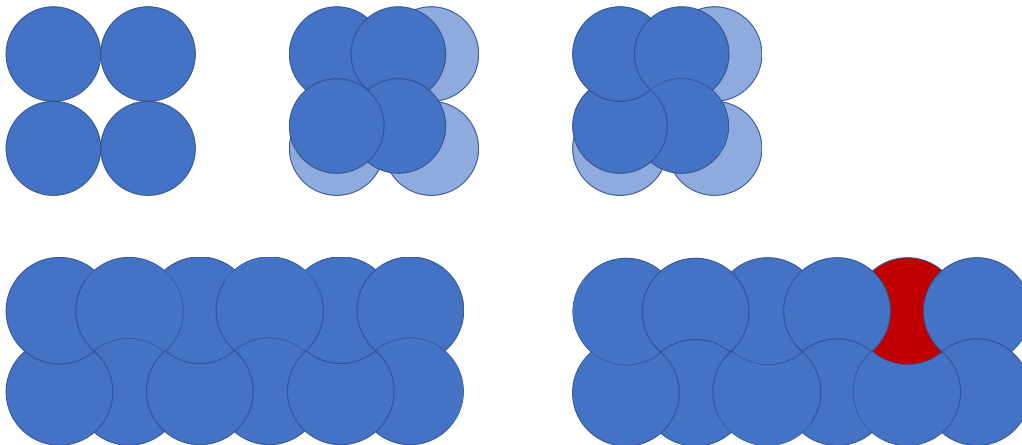


De la gráfica se obtiene que la mayor deflexión en la frecuencia fundamental para membranas de la misma superficie, se obtiene para la membrana circular. Por otro lado, debido al reparto uniforme de la tensión, la membrana circular es la que más eficientemente disipa la energía. De hecho, es también la membrana que más eficientemente radia.

Colocándolo de manera que se consiga una simetría bi-axial que ayude a ocupar el resto del espacio:

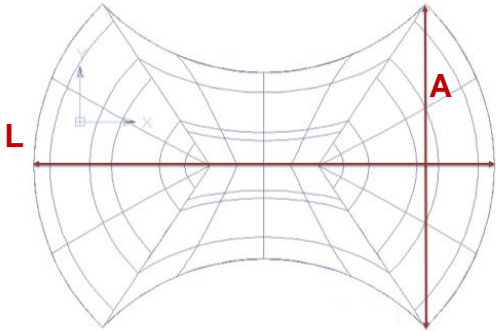


Debido a que en la mayoría de las ocasiones se utiliza como medida correctiva y no hay espacio originalmente destinado a este fin, se han de evitar los espacios sin absorción. Para optimizar al máximo la superficie ocupada por el elemento absorbente, se han de solapar los elementos absorbentes:

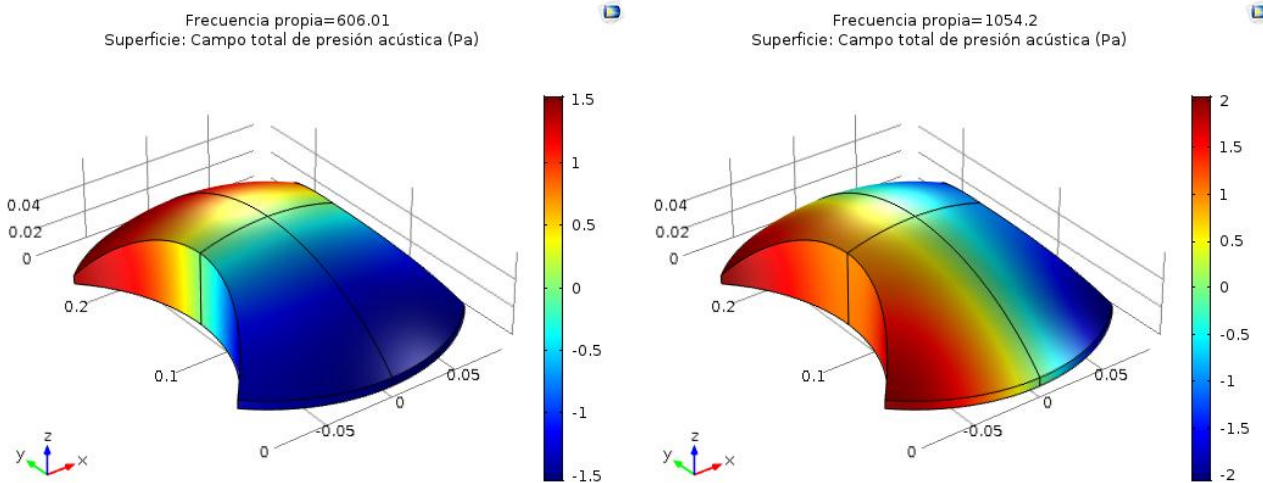


El resultado final, para poder aplicar el solapamiento generando la simetría bidimensional, es una pieza simétrica en dos ejes que permite la simetría y conserva periodicidad en ambos ejes. Por ser elementos independientes tienen mayor facilidad para resonar que una superficie con un relieve, de este modo proporciona un mayor nivel de absorción para las frecuencias de resonancia.

Analizando en régimen estacionario las resonancias generadas en el interior del volumen, se obtiene el modo fundamental en $f = \frac{151.51}{L}$ siendo L la longitud de la pieza.



Tomando una longitud L para ajustar la resonancia por debajo de 630Hz conservando un tamaño que permita su fabricación (L=25cm) se obtiene una pieza de 18cm de ancho (A=18cm). El espesor, como apuntan algunos estudios tiene un efecto insignificante para altas frecuencias [7]. Por otro lado, otros estudios [8] prueban que para lograr un máximo de absorción de un material poroso se produce a un cuarto de la longitud de onda incidente, lo que representaría un espesor de 0,567m para $f=630\text{Hz}$, algo poco difícil de crear, de instalar y antieconómico. Por todo esto y para poder compararlo con el material original, se conserva el espesor a 5cm.



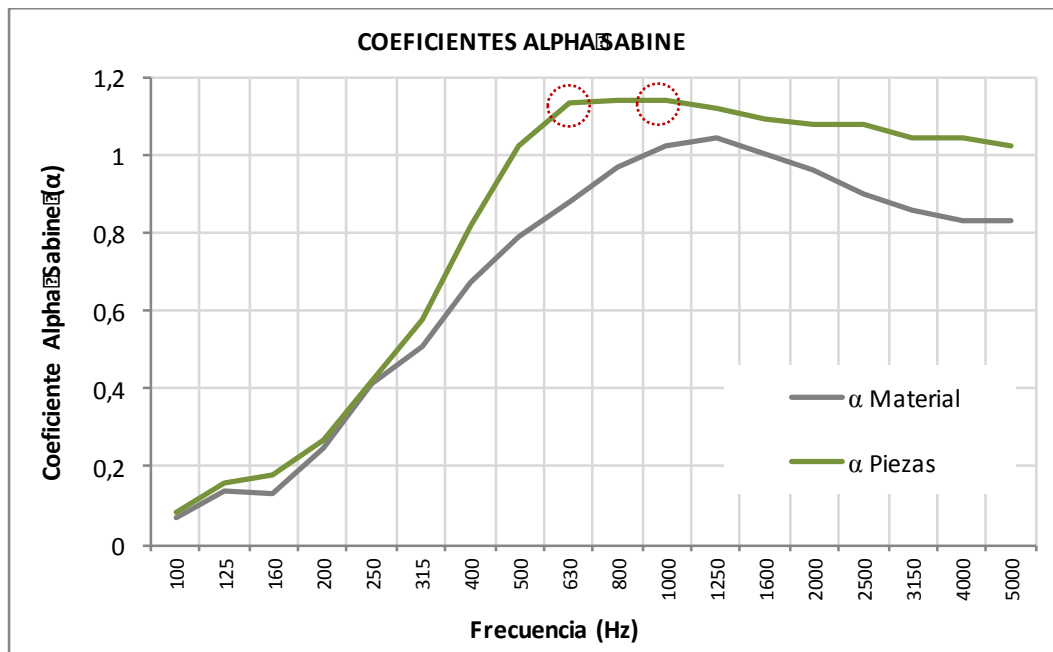
ANÁLISIS EMPÍRICO

Para evaluar la mejora y confirmar de manera empírica lo expuesto, se han realizado ensayos en cámara reverberante bajo la norma ISO 354 [9], donde se obtiene el coeficiente de absorción en campo difuso.



Configuración del ensayo en cámara reverberante

Los ensayos se han realizado para la misma superficie (12m²) en una cámara de 235 m³.



Comprobamos que las resonancias de los dos primeros modos propios (606Hz y 1054Hz) provocan dos máximos de absorción que hacen incrementar la absorción ostensiblemente.

Frecuencia	α Material	α Piezas	α Diff	Mejora
100 Hz	0,05	0,07	0,02	40%
125 Hz	0,16	0,17	0,01	6%
160 Hz	0,13	0,18	0,05	38%
200 Hz	0,27	0,28	0,01	4%
250 Hz	0,38	0,42	0,04	11%
315 Hz	0,48	0,58	0,10	21%
400 Hz	0,68	0,81	0,13	19%
500 Hz	0,80	0,98	0,18	23%
630 Hz	0,85	1,10	0,25	29%
800 Hz	0,95	1,14	0,19	20%

1 KHz	1,00	1,11	0,11	11%
1,25 KHz	1,03	1,11	0,08	8%
1,6 KHz	1,02	1,10	0,08	8%
2 KHz	0,94	1,08	0,14	15%
2,5 KHz	0,89	1,06	0,17	19%
3,15 KHz	0,85	1,04	0,19	22%
4 KHz	0,83	1,05	0,22	27%
5 KHz	0,84	1,00	0,16	19%
NRC	0,80	0,90		

CONCLUSIONES

Es evidente que el área efectiva es mayor para la misma superficie de instalación. Esto resulta en un incremento en el rendimiento en todo el espectro, más acentuado cuanto más alta es la frecuencia, ya que la onda es más directiva. Sin embargo, el efecto más notable es el incremento de la energía absorbida en las frecuencias correspondientes a los modos propios de la pieza.

Se ha comprobado también que la definición del metamaterial ha sido acertada ya que la incorporación de un material textil como membrana permeable al aire, permite actuar al material absorbente, a la vez que trabaja como resonador de membrana.

Con la combinación de materiales (propiedades y combinación) y geometrías se ha conseguido maximizar el rendimiento de absorción para todas las frecuencias que componen la voz humana (300 – 3000Hz).

Para futuros trabajos sería interesante identificar la influencia que tiene la difusión en el comportamiento del sistema de elementos.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Hoda S. Seddeq (2009). Factors Influencing Acoustic Performance of Sound Absorptive Materials. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 3(4): 4610-4617. ISSN 1991-8178
- [2] Dunn IP, Davern WA. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers. Appl Acoust 1986;19:321–34.
- [3] T. Geyer, E. Sarradj and G. Herold. Flow noise generation of cylinders with soft porous cover.
- [4] A. Carrión Isbert. Diseño Acústico de espacios Arquitectónicos
- [5] Beranek L.L. Acoustics. Acoustic Laboratory. Massachusetts Institute of Technology.
- [6] R. Khakpour, Solmaz R. M. Mansouri, A.R. Bahadorimehr. Analytical Comparison for Square, Rectangular and Circular Diaphragms in MEMS Applications.

[7] Ibrahim, M.A. and R.W. Melik, 1978. "Physical Parameters Affecting Acoustic Absorption Characteristics of Fibrous Materials", Proceedings of the mathematical and physical society of Egypt, 46.

[8] Timothy Hirabayashi, David J. McCaa, Robert G. Rebandt, Phillip Rusch and Pranab Saha, 1999. "Automotive Noise And Vibration Control Treatments, Sound and Vibration"

[9] UNE-EN ISO 354:2004 Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante. (ISO 354:2003).