

ESTUDIO DE MODELOS EMPÍRICOS PARA ESPUMAS DE POLIOLEFINAS DE BAJA DENSIDAD

Jesús Alba¹, Juan C. Rodríguez¹, Romina del Rey¹

¹ Departament de Física Aplicada. Centro de Tecnologies Físicas. Universitat Politècnica de València
{e-mail: jesalba@fis.upv.es; roderey@fis.upv.es; juarodve@upv.es}

Resumen

Las propiedades como materiales absorbentes acústicos de las espumas de poro abierto son ampliamente conocidas. Las espumas de poro abierto utilizadas más comúnmente son las espumas de poliuretano (PU). Sin embargo, aunque la gran mayoría provienen de reciclados, las PU presentan limitaciones desde el punto de vista medio-ambiental debido a la alta toxicidad de los humos que se liberan cuando éstas son quemadas para su destrucción. Se hace así necesario la búsqueda de otras espumas como sustitutos potenciales. Las espumas de célula abierta basadas en poliolefinas se han convertido en una buena alternativa. En este trabajo se estudia un tipo en concreto de estas espumas con el fin de modelizarlas: las espumas de polietileno de baja densidad (LDPE) y baja tortuosidad. Estas espumas presentan muy poca homogeneidad y gran dispersión en parámetros fundamentales como, por ejemplo, el diámetro del poro. Esto complica su predicción como material absorbente acústico y hace necesario un estudio más detallado. Un estudio preliminar se presenta en este trabajo.

Palabras clave: Espumas de poro abierto, materiales porosos, baja tortuosidad, absorción sonora, predicción

Abstract

The properties as acoustic absorbent materials of open-cell foams are widely known. The most commonly used open-cell foams are the polyurethane (PU) foams. However, PU foams present limitations from an environmental point of view, such as the toxicity of the fumes released when they are burnt for destruction, although the majority of them come from recycling. It is thus necessary to search for other foams as potential substitutes. Polyolefin based open-cell foams have become a good alternative. In this work, a specific type of these foams is studied with the aim of modeling them: the low tortuosity and low-density polyethylene (LDPE) foams. These foams present very little homogeneity and great dispersion in fundamental parameters as, for example, the pore diameter. This complicates the prediction of its behavior as an acoustic absorbent material, requiring a more detailed analysis. A preliminary study is presented in this work.

Keywords: Open-cell foams, porous material, low tortuosity, sound absorption, prediction.

PACS n°. 43.55.Ev

1 Introducción

Los materiales porosos tienen un uso claro como materiales absorbentes del sonido. En general, los materiales absorbentes porosos son sólidos que contienen cavidades, canales o intersticios por los que viajan las ondas sonoras. Según su composición microscópica se pueden clasificar en celulares, fibrosos o granulares [1, 2].

A partir de finales de la década de 1990, tanto las fibras naturales como los materiales reciclados se presentaron como alternativa a las fibras sintéticas, ya que pueden ofrecer buenas prestaciones térmicas y acústicas con un bajo impacto en el medio ambiente y la salud humana. Se citan únicamente los trabajos más recientes como ejemplo [3–10]. También han aparecido distintos modelos de predicción con estos nuevos materiales [11–13]. A fecha de hoy, la necesidad sigue sin estar cubierta y se busca una transición hacia una economía verde y nuevos productos innovadores sostenibles.

Los modelos empíricos macroscópicos para predecir la absorción sonora también han ido desarrollándose y ajustándose a los nuevos materiales absorbentes porosos. Uno de los modelos más utilizados ha sido el propuesto para materiales absorbentes fibrosos por Delany y Bazley [14] basado en un gran número de mediciones y ajustes en base a tubos de impedancia. Otras actualizaciones y mejoras fueron recomendadas por Miki [15, 16] y más tarde por Mechel y Grundmann [17]. Dunn y Davern [18] también propone otro modelo empírico para el caso de las espumas. Se puede encontrar también un importante conjunto de trabajos realizados por Voronina [19–23] que se centran en la tortuosidad y el factor de estructura. Todos estos modelos se basan en comportamientos más o menos reproducibles, donde se puede reducir la incertidumbre de las variables, y asociar a una tipología concreta de material absorbente. En el caso de comportamientos híbridos, donde se combine el poro abierto con el poro cerrado de forma aleatoria, no hay modelo que dé respuesta clara.

En este trabajo, se estudian las propiedades de absorción de sonido de espumas elaboradas a partir de polietileno de celda abierta (LDPE). Nos centramos en las de baja tortuosidad (LDPELT). Se modelan estas espumas en base a medidas de la resistividad al flujo, impedancia de cierre y coeficiente de absorción en incidencia normal. Como podrá comprobarse, no es fácil proponer modelos de comportamiento en las muestras ensayadas.

2 Caracterización acústica experimental de espumas LDPELT

2.1 Descripción de las espumas

Se han utilizado 7 muestras distintas de LDPELT. Una descripción detallada de este tipo de espumas se puede encontrar en [24]. Las muestras estudiadas presentan espesores entre los 26 y 29 mm y densidades entre los 34 y 46 kg/m³. En la Tabla 1 se muestran estos datos con detalle para cada una de las 7 espumas ensayadas. En la Figura 1 se puede observar imágenes de estas espumas.



Figura 1 - Espuma LDPE de baja tortuosidad

2.2 Ensayo de la resistividad al flujo.

La norma ISO 9053-1:2018 [25] define el procedimiento para obtener la resistencia al flujo del aire de materiales porosos, mediante el método de flujo de aire estático.

La resistencia al flujo del aire, R , se define como el cociente entre la diferencia de presión de aire a lo largo del material, con respecto a la presión atmosférica, y el ratio volumétrico de flujo de aire que atraviesa el material. A partir de este valor, se puede calcular la resistencia al flujo específica, R_s , que a su vez permite determinar la resistividad al flujo del aire del material, σ .

En el anexo A de esta norma se indica que la medida de resistividad al flujo del aire se puede estimar mediante medidas en tubos de impedancia. El método indirecto de Ingard & Dear [26] ha sido validado por diversos estudios como un procedimiento válido para la estimación de la resistividad al flujo del aire de materiales porosos y es el que se ha utilizado en este estudio. Los resultados de la resistividad al flujo (resistencia al flujo por unidad de longitud de la muestra) de las 7 espumas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 - Datos de ensayo de resistividad al flujo de 7 muestras

	Espesor (mm)	Densidad volumétrica (kg/m ³)	Densidad superficial (kg/m ²)	Resistividad al flujo (kNs/m ⁴)	Error (kNs/m ⁴)	Error relativo (%)
LDPELT1	29,0	36	1,04	10,2	0,3	3,0
LDPELT2	28,0	46	1,29	96,6	11,3	11,6
LDPELT3	27,0	37	1,00	12,3	0,6	4,9
LDPELT4	27,0	34	0,92	7,5	0,2	2,6
LDPELT5	26,5	34	0,90	7,8	0,3	3,4
LDPELT6	26,0	38	0,99	42,0	4,9	11,6
LDPELT7	27,0	36	0,97	43,3	4,2	9,7

Se observa una alta dispersión entre los valores de la resistencia al flujo de las diferentes muestras. Para cada una de las muestras, el error relativo es adecuado y aumenta con la resistividad al flujo. Si se realiza un promedio de todo el conjunto de espumas LDPELT, el resultado de la resistividad al flujo es de $31,4 \pm 32,8$ kNs/m⁴, es decir, el error supera a la magnitud, lo que indica que hay un exceso de variabilidad en la muestra, por algún motivo. Esto se intentará analizar y resolver en apartados siguientes.

2.3 Ensayos de la impedancia acústica y coeficiente de absorción en incidencia normal.

Se realizan ensayos con las directrices establecidas por la norma UNE-EN ISO 10534-2:2002 [27]. En concreto, se determinan valores de impedancia acústica superficial del material, z_s , de la que se obtiene posteriormente el valor del coeficiente de absorción en incidencia normal, α .

Se miden en tubo de impedancia las 7 espumas, pero diferenciando como cara incidente las caras A y B de todas las muestras. La cara A es por donde se ha cortado la muestra. En la figura 2 se pueden ver los resultados del coeficiente de absorción en incidencia normal de las caras A y B, respectivamente.

En la Figura 2 se observa que para la cara A de las muestras existe una dispersión importante de los resultados. Si se analizan los resultados del coeficiente de absorción en incidencia normal para la cara B, excepto en el caso de la muestra 2, la dispersión es menor. Cabe recordar que todas las muestras (exceptuando la 2) presentan casi el mismo espesor y densidad (Tabla 1).

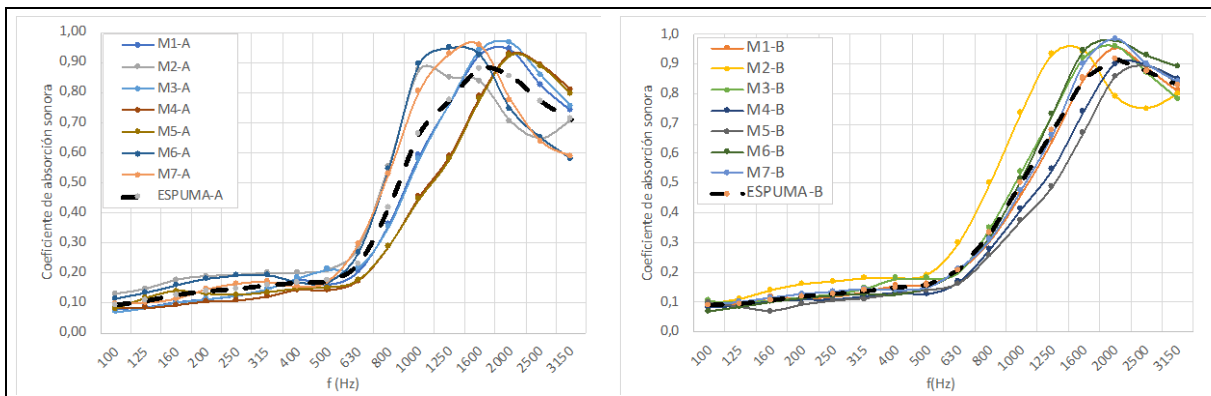
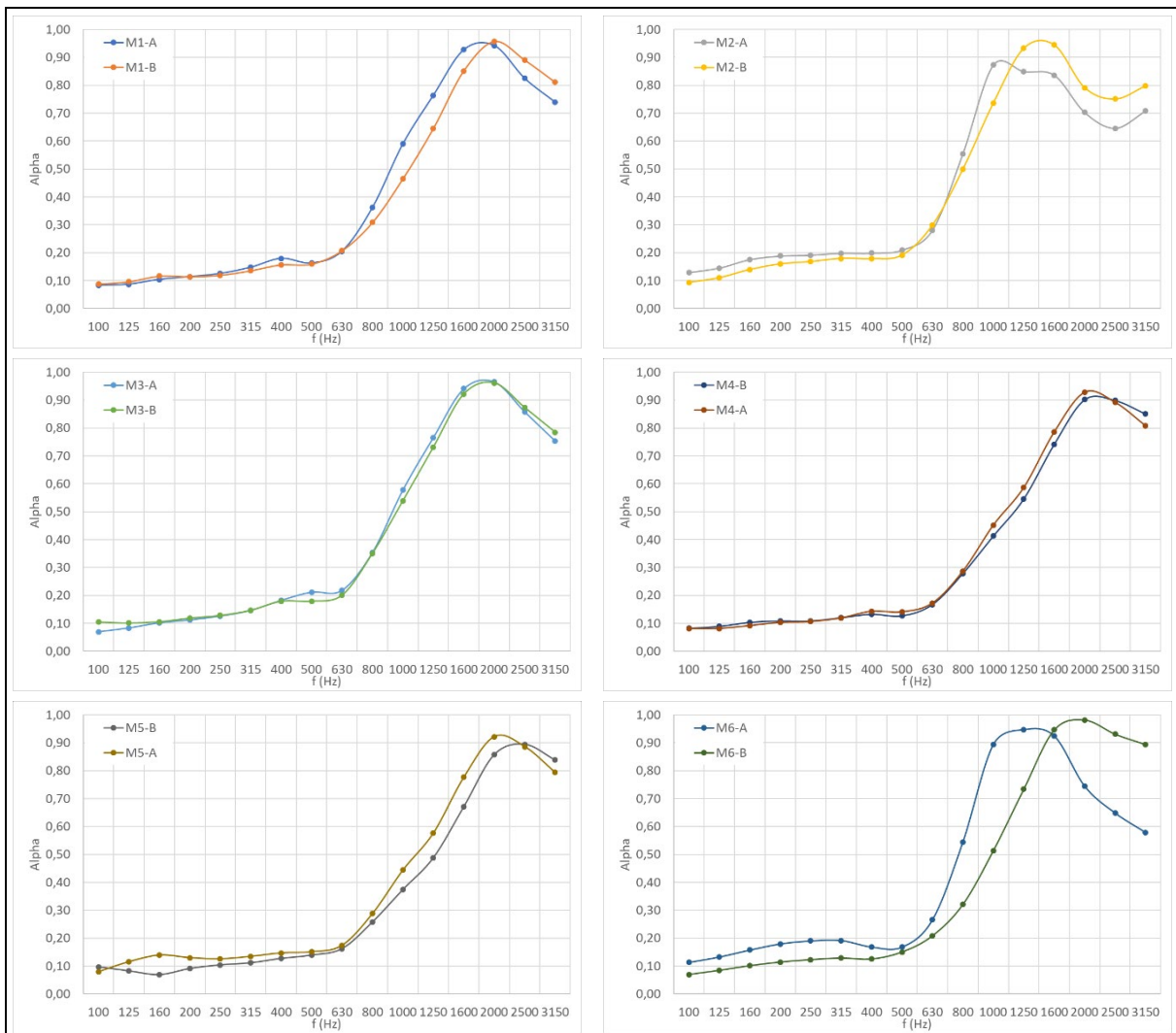


Figura 2 - Coeficiente de absorción en incidencia normal de las 7 espumas estudiadas (izquierda: cara A; derecha: cara B).

En la Figura 3 se compara el coeficiente de absorción sonora de ambas caras de una misma muestra.



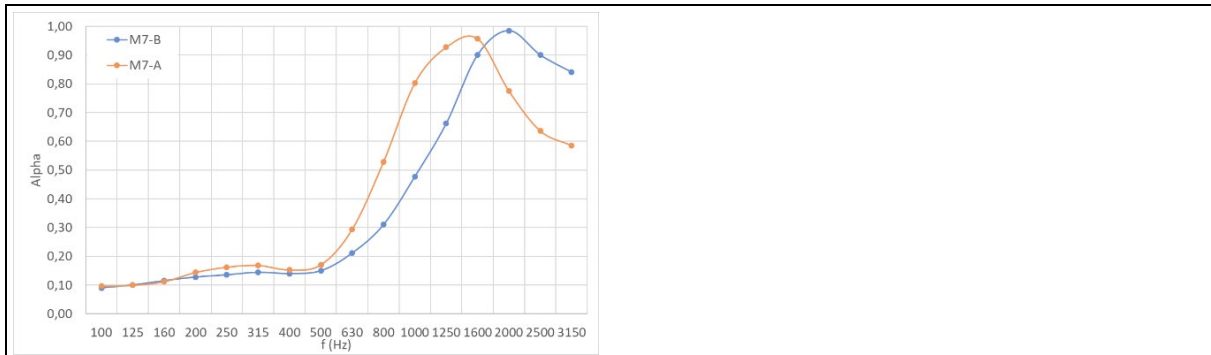


Figura 3 - Comparativa entre las caras de cada muestra de material

Sólo las muestras 3 y 4 podrían considerarse similares. Algo menos las muestras 1 y 5. En las muestras 2, 6 y 7 ya pueden verse diferencias claras entre ambas caras. Esto puede deberse a algún efecto superficial en las muestras, que se visualiza en función de la cara de ensayo.

Se decide ampliar el estudio con el análisis de la parte real e imaginaria de la impedancia superficial de ambas caras. Estos valores se muestran en la Figura 4 y en la Figura 5, respectivamente.

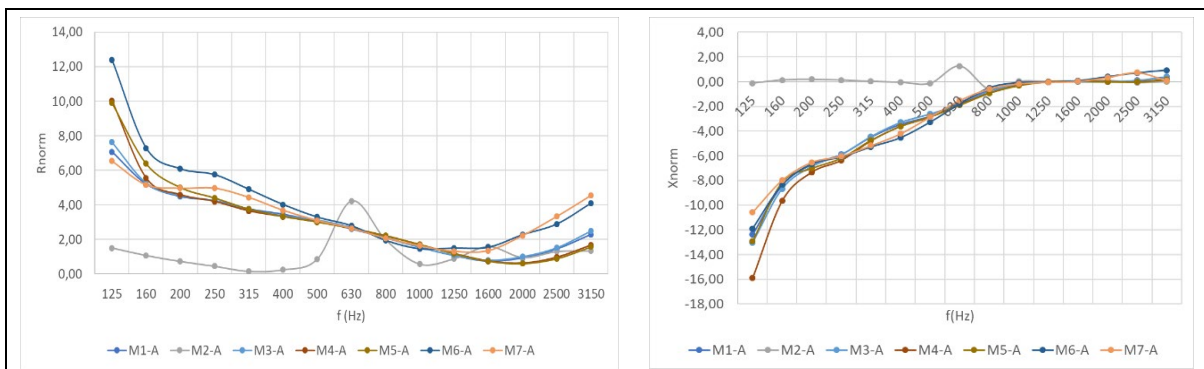


Figura 4 - Ensayos impedancia normalizada (cara A)

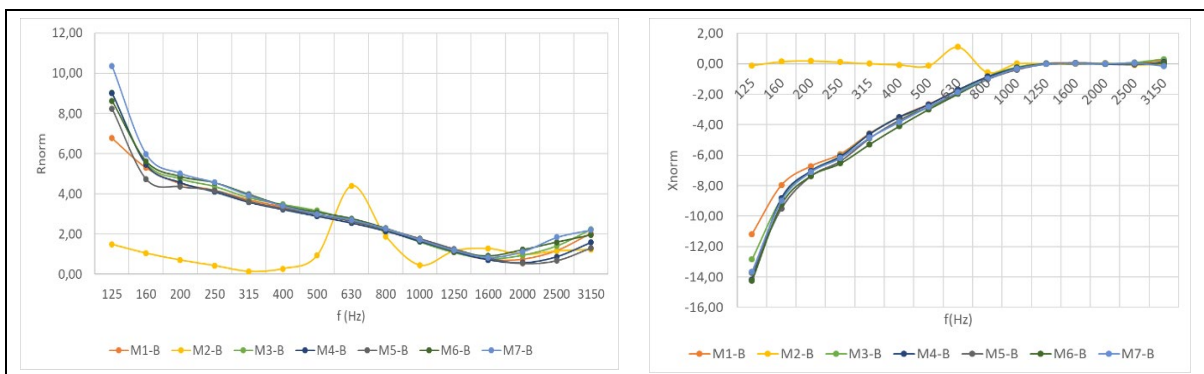


Figura 5 - Ensayos impedancia normalizada (cara B)

Pueden verse mayores diferencias en la cara A y también cómo la muestra 2 tiene un efecto diferente al resto, más propio de poro cerrado que de poro abierto, con un pico de resonancia, independientemente de la cara de ensayo.

De los resultados que se muestran en los apartados 2.2 y 2.3 se concluye que las 7 muestras, de un mismo tipo de espuma, tienen comportamientos distintos. La muestra 2, de mayor densidad que el resto, tiene un comportamiento de poro cerrado y no de poro abierto, tal y como marca su impedancia de cierre normalizada, con un pico en 630 Hz. Puede que este comportamiento, su densidad y su resistividad al flujo totalmente fuera de rango del promedio de las restantes, sea un defecto de fabricación. Si no lo es, debería considerarse también esta muestra en el modelo.

Respecto al resto de muestras, las muestras 1, 3, 4 y 5 se comportan de una forma más parecida. Los ensayos de cara A y cara B son bastante similares. También puede verse semejanza en el comportamiento de la impedancia de cierre normalizada. No tienen resistividad al flujo igual, pero se observa una dependencia con la densidad volumétrica, que se muestra en la Figura 6. En este caso, puede considerarse que las muestras tienen comportamiento similar, donde los cambios de densidad aumentan la resistividad al flujo. En la Figura 6 se ve el buen grado de ajuste de las muestras 1,3, 4 y 5 en función de la densidad.

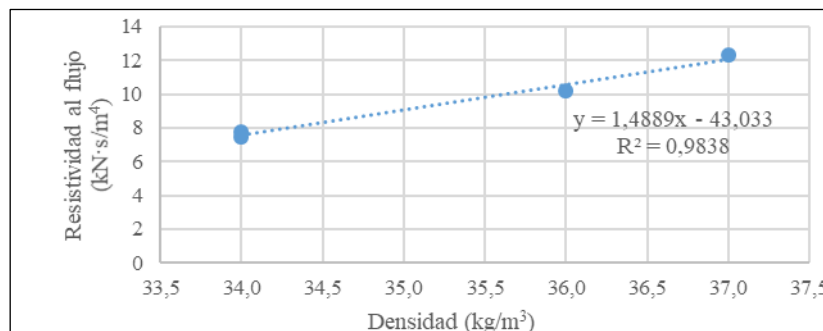


Figura 6 - Ajuste muestras 1, 3, 4 y 5. Resistividad al flujo/Densidad.

Respecto a las muestras 6 y 7 puede verse como el coeficiente de absorción de ambas caras no coincide, aunque ambas tienen una resistividad al flujo parecida de 42 – 43 kNs/m⁴. Se produce un desplazamiento hacia la izquierda del pico de absorción de la cara A. La impedancia de cierre normalizada muestra también diferencias en ambas caras. En la Figura 7 se reproducen valores de las figuras 4 y 5, comparando, para la muestra 6, las impedancias de las caras A y B.

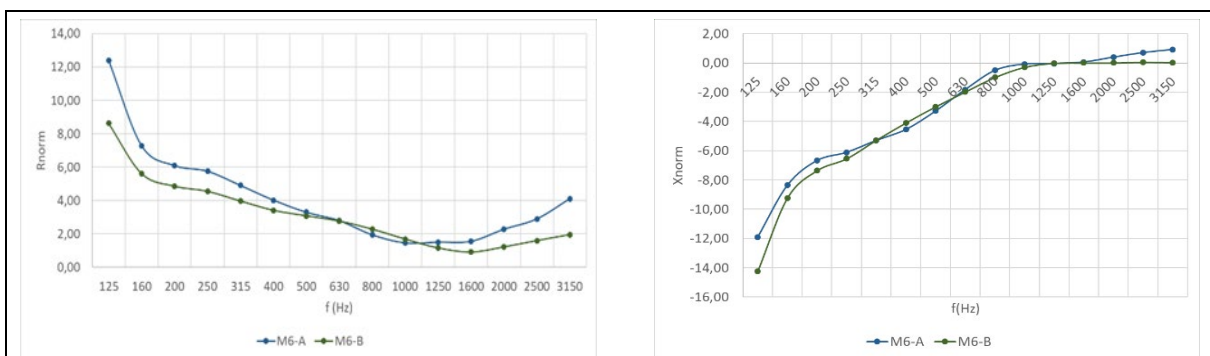


Figura 7 - Impedancia normalizada muestra 6. Comparación cara A y B.

Este desplazamiento indica que debe existir algún efecto superficial, tipo “velo” o similar, que modifica la curva de absorción sonora. Este planteamiento se intenta modelar en el apartado siguiente.

3 Modelado

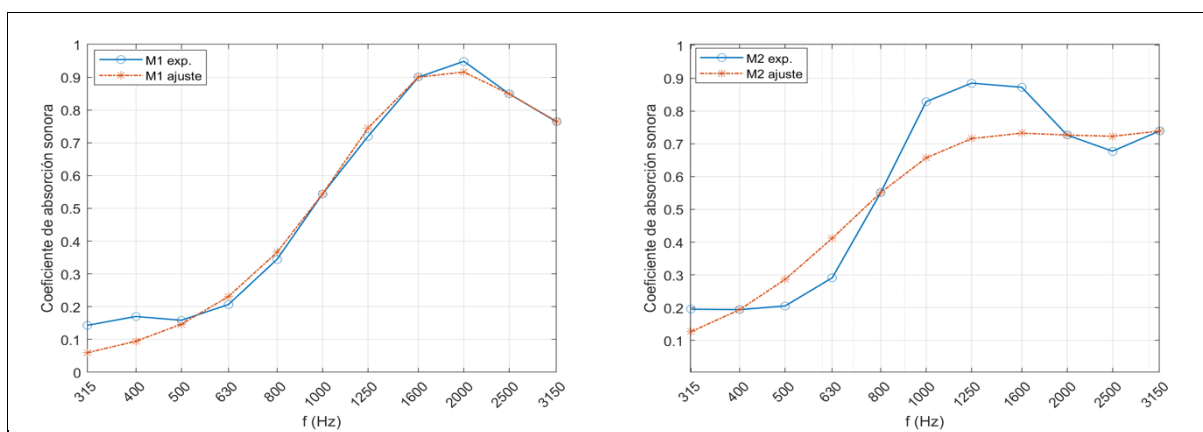
3.1 Modelo empírico clásico

Se intenta ajustar las muestras ensayadas a las fórmulas que representan modelos empíricos sencillos basados en la resistividad al flujo del aire, para poro abierto o fibra, basándose en el modelo de Delany & Bazley [14] y que otros muchos autores han seguido [3,5,12]. En estos modelos se describen la impedancia característica (Z_c) y la constante de propagación característica (K_c) a partir de la resistividad al flujo y de ocho parámetros que permiten el ajuste (C_i ; $i=1,\dots,8$).

En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de estos parámetros de ajuste para cada una de las muestras y en la Figura 8, todos los ajustes (línea discontinua) comparando con los valores experimentales (línea continua).

Tabla 2 - Resultados de los ajustes de modelo empírico para las muestras de LDPELT estudiadas. Error asociado experimental/modelado.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	Error
M1	0,1443	1,3294	0,0432	0,5332	0,1266	0,5152	0,1378	0,9826	0,0948
M2	0,1415	0,7506	0,0595	0,7333	0,1869	0,4794	0,1448	0,9094	0,2178
M3	0,1318	1,4273	0,0397	0,332	0,1249	0,5213	0,1329	1,004	0,1032
M4	0,1824	1,3802	0,0339	0,4975	0,1594	0,5321	0,148	0,9192	0,0842
M5	0,1854	1,255	0,0388	0,5178	0,1438	0,6346	0,1348	0,8976	0,1049
M6	0,1687	0,9251	0,0513	0,6274	0,1438	0,4775	0,1445	0,6883	0,1039
M7	0,1403	0,9495	0,0481	0,6927	0,1489	0,4729	0,1274	0,6406	0,0862



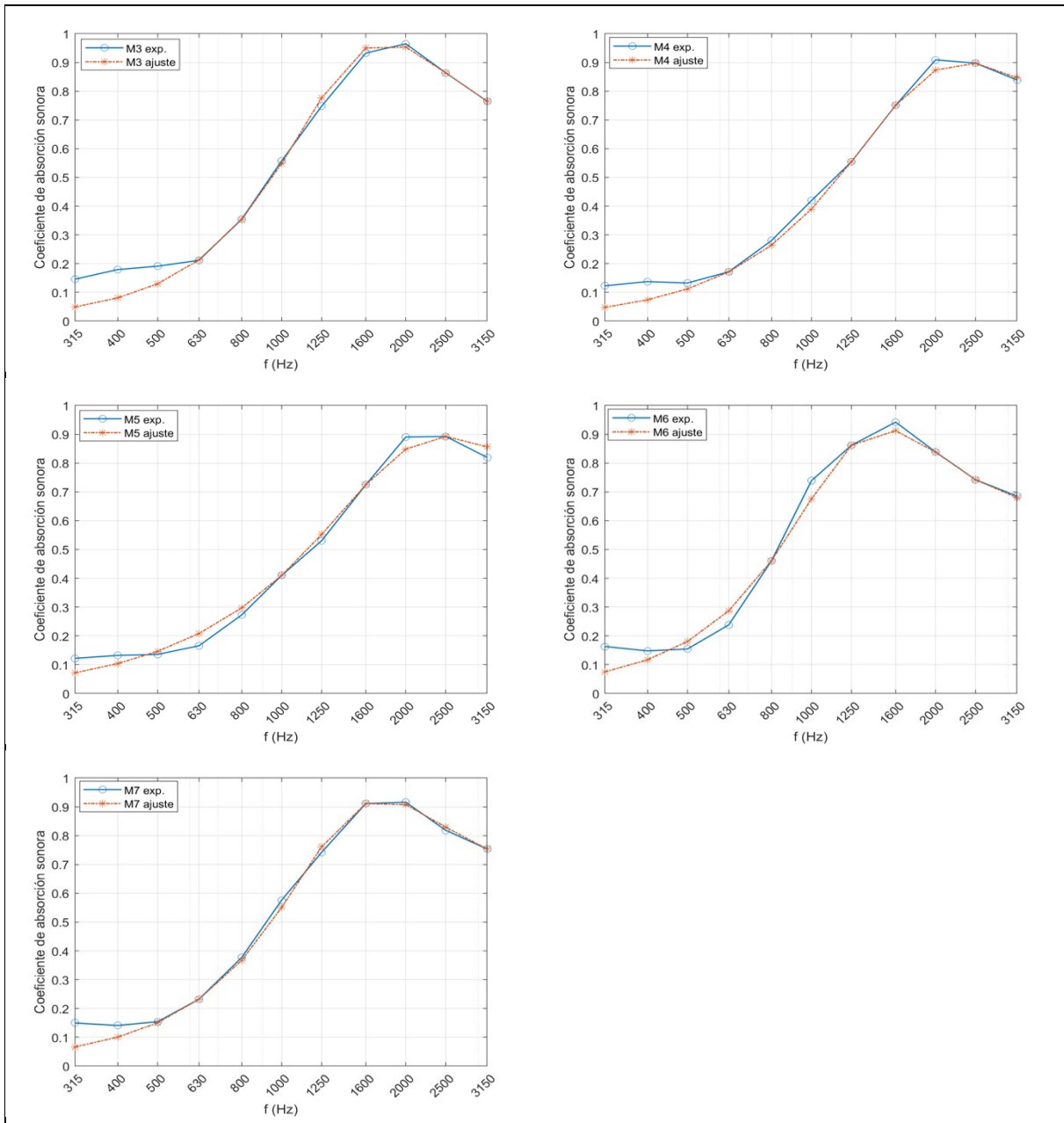


Figura 8 - Ajustes de cada material con promedios de las caras.

En las diferentes gráficas de la Figura 8 puede verse el buen grado de ajuste, siendo el caso peor la muestra 2. Las muestras en sí son ajustables con modelos empíricos como el propuesto.

3.2 Modelado de material absorbente con velo

Se considera estudiar las caras A y B de estas espumas como una composición de un material poroso base más un velo. Se pretende realizar el modelado a través de matrices de transferencia. Se tiene en cuenta una matriz de transferencia para el comportamiento del absorbente, y otra que modela el efecto “velo” con una impedancia Z_v . En el caso de la cara A, suponiendo velo incidente:

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_v \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) & Z \sinh(\Gamma d) \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} & \cosh(\Gamma d) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) + Z_v \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} & Z \sinh(\Gamma d) + Z_v \cosh(\Gamma d) \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} & \cosh(\Gamma d) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = p_3 \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) + Z_v \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$Z_s = \frac{\cosh(\Gamma d) + Z_v \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z}}{\frac{\sinh(\Gamma d)}{Z}} = Z \coth(\Gamma d) + Z_v \quad (12)$$

Por tanto, en la impedancia de cierre aparece el efecto del absorbente, junto con la suma del velo. En el caso de la cara B con velo, al final:

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) & Z \sinh(\Gamma d) \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} & \cosh(\Gamma d) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & Z_v \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) & Z_v \cosh(\Gamma d) + Z \sinh(\Gamma d) \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} & Z_v \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} + \cosh(\Gamma d) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = p_3 \begin{pmatrix} \cosh(\Gamma d) \\ \frac{\sinh(\Gamma d)}{Z} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$Z_s = \frac{\cosh(\Gamma d)}{\frac{\sinh(\Gamma d)}{Z}} = Z \coth(\Gamma d) \quad (16)$$

Puede verse que, en este caso, el efecto del velo, al pegarlo sobre la pared trasera, desaparece. Por tanto, si se realiza la resta de ambas caras (ecuación 12 menos ecuación 16) debería dar el efecto del velo “ Z_v ”. En la Figura 9, se muestra el resultado de la impedancia del velo normalizada para las muestras 6 y 7. Se observa que este valor no es nulo, lo que indica que algún mecanismo de absorción diferente existe entre las dos caras, además, este valor depende de la frecuencia. Existe algún tipo de efecto superficial que modifica la impedancia superficial y la absorción del material.

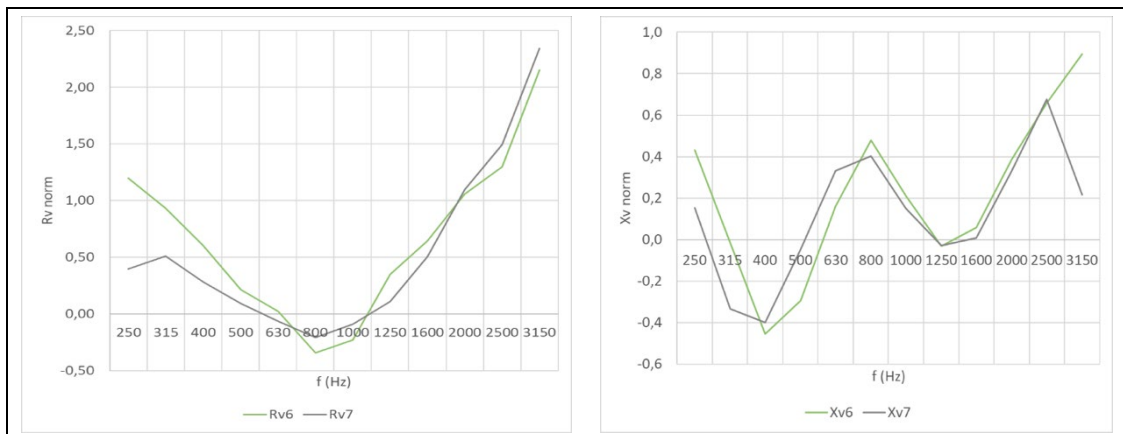


Figura 9 - Efecto “velo” en las muestras 6 y 7.

Aun dada toda esta dispersión, y particularidad en diferentes muestras de un mismo material, el modelo que se propone se basaría en la construcción de un promediado de las ecuaciones propuestas por Delany & Bazley con los coeficientes propios que se muestran en la Tabla 2. Con la peculiaridad de estas muestras de LDPELT, con algunos de sus poros cerrados, no sería posible el ajuste a un modelo empírico individual, pero sí, obtener el valor promedio del comportamiento de las muestras y su probabilidad de aparición. En la Figura 10 se muestra el coeficiente de absorción en incidencia normal construido a partir de este modelo empírico, junto con el promedio experimental.

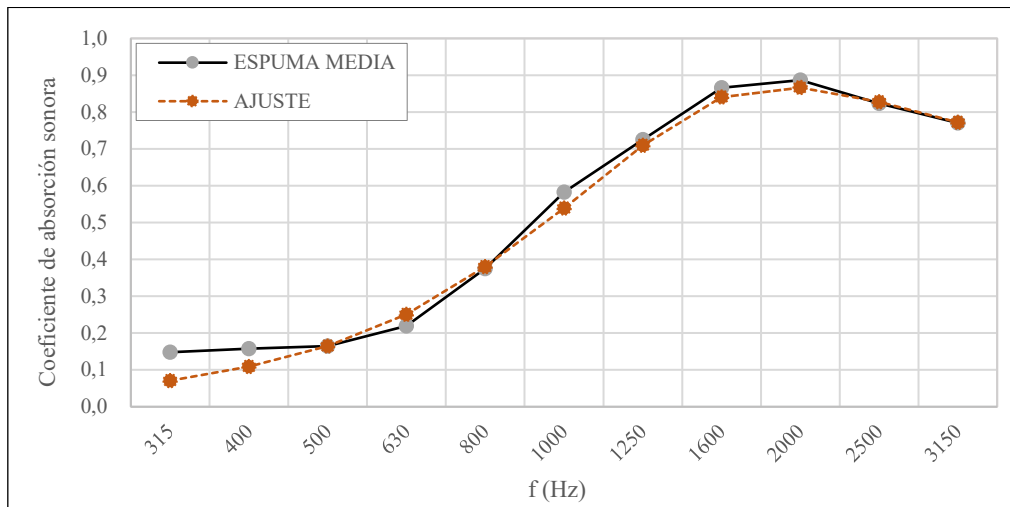


Figura 10 - Ajuste del modelo heterogéneo y media de ensayos experimentales.

El poder confiar en un modelo de comportamiento, incluso con esta heterogeneidad de muestras es de gran utilidad, ya que nos permitiría estimar, por ejemplo, el coeficiente de absorción en incidencia aleatoria, cuya expresión se puede encontrar en la UNE-EN 12354-6: 2004 .

4 Conclusiones

En este trabajo se ha realizado un estudio preliminar de espumas LDPE que teóricamente son de poro abierto, pero en las que se ha detectado un efecto combinado entre poro abierto y poro cerrado, tal y como se ha medido y argumentado en el apartado 2. Este efecto produce gran dispersión en la obtención de parámetros y dificulta la obtención de modelos.

La propuesta de modelo se basa en la obtención individual de modelos empíricos locales, como se ha mostrado en la Tabla 2. Una vez obtenidos, se puede realizar la combinación lineal de estos modelos locales para obtener efectos superficiales, es decir, poder ofrecer información sobre una superficie elegida. Estos modelos permitirán también obtener, con la combinación adecuada, otros efectos, como la posibilidad de aislamiento acústico en su uso en sistemas multicapa.

Para corroborar este método, dada la dispersión entre muestras, es necesario aumentar considerablemente el número de probetas de ensayo, para que el conjunto de muestras represente lo mejor posible los porcentajes de comportamiento del material, y refinar los datos que aparecen en este trabajo.

La combinación de modelos empíricos porcentuales, como en este caso, podría ser una solución a un ajuste de este tipo de materiales heterogéneos.

Agradecimientos

Este trabajo está subvencionado por el programa ACIF-2020 de la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital de la Generalitat Valenciana y el Fondo Social Europeo (ACIF/2020/401).

Referencias

- [1] Crocker, M. J.; Arenas, J. P. Use of Sound-Absorbing Materials, in *Handbook of Noise and Vibration Control*, New York: John Wiley and Sons, 2007, pp. 696–713.
- [2] Arenas, J. P.; Crocker, M. J. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, *Sound & vibration*, vol. 44 (7), 2010, pp. 12–17.
- [3] Berardi, U.; Iannace, G. Predicting the sound absorption of natural materials: Best-fit inverse laws for the acoustic impedance and the propagation constant, *Applied Acoustics*, vol. 115, 2017, pp. 131–138.
- [4] Asdrubali, F. *et al.* Experimental thermo-acoustic characterization of innovative common reed bio-based panels for building envelope, *Building and Environment*, vol. 102, 2016, pp. 217–229.
- [5] Berardi, U.; Iannace, G. Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications, *Building and Environment*, vol. 94, 2015, pp. 840–852.
- [6] Or, K. H.; Putra, A.; Selamat, M. Z. Oil palm empty fruit bunch fibres as sustainable acoustic absorber, *Applied Acoustics*, vol. 119, 2017, pp. 9–16.
- [7] del Rey, R.; Berto, L.; Alba, J.; Arenas, J. P. Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barriers, *Noise Control Engineering Journal*, vol. 63 (5), 2015, pp. 439–447.
- [8] Othmani, C. *et al.* Acoustic characterization of a porous absorber based on recycled sugarcane wastes, *Applied Acoustics*, vol. 120, 2017, pp. 90–97.

- [9] Buratti, C.; Belloni, E.; Lascaro, E.; Lopez, G. A.; Ricciardi, P. Sustainable Panels with Recycled Materials for Building Applications: Environmental and Acoustic Characterization, *Energy Procedia*, vol. 101, 2016, pp. 972–979.
- [10] Asdrubali, F.; Pisello, A. L.; Alessandro, F. D.; Bianchi, F.; Cornicchia, M.; Fabiani, C. Innovative Cardboard Based Panels with Recycled Materials from the Packaging Industry: Thermal and Acoustic Performance Analysis, *Energy Procedia*, vol. 78, 2015, pp. 321–326.
- [11] Allard, J.; Champoux, Y. New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91 (6), 1992, pp. 3346–3353.
- [12] Garai, M.; Pompoli, F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, *Applied Acoustics*, vol. 66 (12), 2005, pp. 1383–1398.
- [13] Komatsu, T. Improvement of the Delany-Bazley and Miki models for fibrous sound-absorbing materials, *Acoustical Science and Technology*, vol. 29 (2), 2008, pp. 121–129.
- [14] Delany, M. E.; Bazley, E. N. Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Applied Acoustics*, vol. (3), 1970, pp. 105–116.
- [15] Miki, Y. Acoustical properties of porous materials. Modifications of Delany-Bazley models., *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, vol. 11 (1), 1990, pp. 19–24.
- [16] Miki, Y. Acoustical properties of porous materials. Generalizations of empirical models., *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, vol. 11 (1), 1990, pp. 25–28.
- [17] Mechel, F. P. *Formulas of Acoustics*, 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [18] Dunn, I. P.; Davern, W. A. Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers, *Applied Acoustics*, vol. 19 (5), 1986, pp. 321–334.
- [19] Voronina, N. Acoustic properties of fibrous materials, *Applied Acoustics*, vol. 42 (2), 1994, pp. 165–174.
- [20] Voronina, N. An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity, *Applied Acoustics*, vol. 58 (3), 1999, pp. 295–304.
- [21] Voronina, N. An empirical model for elastic porous materials, *Applied Acoustics*, vol. 55 (1), 1998, pp. 67–83.
- [22] Voronina, N. An empirical model for rigid frame porous materials with high porosity, *Applied Acoustics*, vol. 51 (2), 1997, pp. 181–198.
- [23] Voronina, N. ; Horoshenkov, K. . A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media, *Applied Acoustics*, vol. 64 (4), 2003, pp. 415–432.
- [24] Alba, J.; López, E.; del Rey, R.; Rodríguez-Pérez, M.; Sainz-Arroyo, C.; Rodríguez, J. C. Empiric acoustic modeling of open-cell polyolefin foams, *INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*, 2019.
- [25] ISO 9053-1:2018. Acoustics. Determination of airflow resistance. Part 1: Static airflow method, 2018.
- [26] Ingard, K. U.; Dear, T. A. Measurement of acoustic flow resistance, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 103 (4), 1985, pp. 567–572.
- [27] UNE-EN ISO 10534-2:2002. Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia, 2002.