

Propuesta de modelo empírico para materiales absorbentes acústicos

Jesús Alba¹, Jaime Ramis², M^a. Teresa Lorenzana³ y Romina del Rey¹

¹ Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras-IGIC
Escuela Politécnica Superior de Gandía
Universidad Politécnica de Valencia
Carretera Nazaret-Oliva S/N, 46730 Grao de Gandia, Valencia, España
Tel.: 34 62 849 314; Fax: 34 62 849 309
e-mail: jesalba@fis.upv.es, web: <http://www.fisgan.upv.es/disao/>

² Dpto. Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría
Universidad de Alicante
Apdo. Correos 99, 03080 Alicante, España
e-mail: jramis@ua.es

³ Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica/La Coruña
Universidad de La Coruña
Campus de A Zapateira, 15071 La Coruña, España
e-mail: lorenzan@udc.es, jramis@fis.upv.es

Resumen

Los materiales absorbentes acústicos son cada vez más importantes en diferentes ámbitos: acústica en la construcción, automoción, aire acondicionado, etc. Existen diferentes modelos para predecir el comportamiento acústico de materiales. Algunos de estos se basan en el ajuste de datos experimentales a una serie de fórmulas empíricas que permiten la predicción en un rango razonable. Además, la norma UNE-EN 12354-6 permite la predicción de la absorción sonora de cualquier material absorbente fibroso con las fórmulas propuestas por Delany & Bazley. En este trabajo se realiza una revisión de los diferentes modelos para predecir el comportamiento de materiales absorbentes acústicos y se realiza un nuevo ajuste buscando un nuevo modelo que se adapte mejor a todo tipo de materiales absorbentes.

Palabras clave: *ingeniería acústica, materiales absorbentes, modelos, resistencia al flujo, materiales acústicos, construcción.*

PROPOSAL A EMPIRICAL MODEL FOR ABSORBENT ACOUSTICAL MATERIALS

Summary

The absorbent acoustics materials are more and more important in different scopes: building acoustics, auto motion, solutions for the refrigerated air, etc. Are accepted models, several of these models are empirical. They are obtained from the equation adjustment experimental values; the results are acceptable in a reasonable interval. Moreover, in the standard UNE-EN 12354-6, these models are accepted like the fundamental basis and they allow to predict the sound absorption coefficient the all fibrous material with the Delany&Bazley equations. This work presents a revision of the different models and realises a new adjustments with the objective to find a new model that show better results for the behaviour the all absorbent acoustical materials.

Keywords: *acoustic engineering, absorbents, acoustic models, flow resistance, acoustic materiales, constructions.*

INTRODUCCIÓN

Actualmente los materiales absorbentes acústicos, tales como lanas minerales u orgánicas, lanas de vidrio o textiles, son ya comunes, no sólo en el ámbito de la construcción, sino en otros como la automoción, la electroacústica, etc. Además, este tipo de materiales está en continuo desarrollo, apareciendo en el mercado no sólo las tradicionales lanas minerales, sino nuevas lanas textiles o con base de fibras naturales.

Desde hace varios años se investiga en la obtención de modelos para obtener el comportamiento acústico de materiales acústicos absorbentes. Los modelos más básicos intentan modelar el comportamiento frecuencial de los materiales, utilizando como base dos variables conocidas como impedancia característica y constante de propagación, que sirven para predecir el comportamiento de propagación y absorción en el seno de estos materiales, entre otras cosas.

La diversidad de modelos es amplia. hay modelos como los de Allard & Champoux¹, Attenborough^{2,3} y Voronina⁴ que han sentado las bases de diferentes líneas de trabajo. Estos modelos buscan la caracterización completa de materiales porosos o fibrosos, a partir de diferentes características: densidad, módulo de compresibilidad, resistencia al flujo, factor de estructura, tortuosidad, etc.

Al mismo tiempo, han ido apareciendo diferentes modelos empíricos más sencillos que se basan en diferentes ajustes de medidas de materiales a ecuaciones lineales u otras. Los materiales absorbentes más clásicos en este sentido han sido desarrollados para lana de roca o lana de vidrio, aunque el uso de otros materiales ha favorecido la incorporación de otros materiales fibrosos y porosos. Uno de los modelos más conocido en esta línea es el de Delany & Bazley⁵. En esta línea aparecen trabajos posteriores como el de Miki^{6,7} para mejorar los coeficientes del ajuste propuesto, modelos para foam como el de Dunn & Davern⁸ o para fibras textiles como el de Garai & Pompoli⁹. existen otros trabajos empíricos como de¹⁰ Wang *et al.*, basado en una regresión a diferentes variables o el de Shoshani, Y. Yakubov¹¹ para la búsqueda de la máxima absorción. No hay que olvidar tampoco los diferentes modelos empíricos propuestos por Voronina¹²⁻¹⁵, donde aparecen parámetros como la tortuosidad o factor de estructura, asociados a la distribución de las fibras o poros que caracterizan estos materiales.

En este contexto además, están apareciendo normas acústicas como la UNE-EN 12354:2003 “estimación de las características acústicas de las edificaciones a partir de las características de sus elementos”, y en concreto la parte 6:2003, “absorción sonora en espacios cerrados”¹⁶ que permiten el uso de fórmulas para la predicción de la absorción de materiales absorbentes. En el caso de materiales de fibra, Delany & Bazley⁵ es la referencia, y en el caso de materiales de poro, Dunn & Davern⁸ es el modelo elegido por la norma.

En el presente trabajo se realiza en primer lugar un repaso a los modelos empíricos más sencillos, basados en ajustes lineales⁵⁻⁹ como los propuestos para la norma referenciada. Además, se realizan diferentes campañas de medidas de diferentes materiales absorbentes fibrosos, con el fin de ajustar a unas ecuaciones únicas, tanto los más clásicos, como otros de nueva generación, y en la filosofía de la norma, que aparece referenciada en el Código Técnico de la Edificación, en el borrador del Documento Básico de Protección contra el ruido (DB-HR del CTE). Además, dado que este tipo de modelos se utiliza como referencia, se realiza una discusión respecto a la estabilidad frente a errores sistemáticos de las variables que sirven para caracterizar al material.

MODELOS PARA MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS

En general, la propagación del sonido a través de un material homogéneo e isotrópico en el dominio de la frecuencia está determinada por dos valores complejos, la constante de propagación compleja (Γ) y la impedancia característica compleja (Z):

$$\Gamma = \alpha + j\beta \quad (1)$$

$$Z = R + jX \quad (2)$$

En la actualidad existen varios modelos teóricos que se basan en la resistencia específica al flujo por unidad de longitud (σ) para obtener estas variables. Esta variable mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor, e , de éste. Depende del gradiente de presiones en las caras del material, ∇p , y de la velocidad de vibración dentro de él, u :

$$\sigma = \frac{\nabla p}{e \cdot u} \quad (3)$$

Existen otros modelos basados en el diámetro de la fibra, la porosidad del material, etc., que serán objeto de futuros trabajos.

Modelos Empíricos

Modelo de Delany & Bazley

En el modelo de Delany & Bazley⁵, la constante de propagación compleja Γ y la impedancia característica compleja Z , pueden obtenerse de forma teórica mediante las siguientes expresiones:

$$Z = \rho_o c_o \left[1 + 0,0571 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0,754} - j0,087 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0,732} \right] \quad (4)$$

$$\Gamma = \frac{j2\pi f}{c_o} \left[1 + 0,0978 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0,700} - j0,189 \left(\frac{\rho_o f}{\sigma} \right)^{-0,595} \right] \quad (5)$$

siendo $j = \sqrt{-1}$, ρ_o (kg/m³) la densidad del aire, f (Hz) la frecuencia, c_o (m/s) la velocidad del sonido en el aire y σ (N·s/m⁴) la resistencia específica al flujo. Las relaciones (4) y (5) se basan en interpolaciones de medidas en función del cociente $\rho_o \cdot f / \sigma$. El rango válido para estas relaciones es el siguiente:

$$10^{-2} \leq \frac{\rho_o f}{\sigma} \leq 1 \quad (6)$$

donde las magnitudes físicas se encuentran expresadas en el Sistema Internacional de unidades (S.I.). Por tanto, tal y como se justifica en⁵, para valores de $\rho_o \cdot f / \sigma$ fuera de este rango no son aplicables estas expresiones. Las desviaciones del modelo son más apreciables a baja frecuencia. Otros autores² han revisado este rango, limitando la baja frecuencia a 0.04. Existen también reajustes de este modelo para materiales y fabricantes concretos.

Modelo de Miki

En el modelo de Miki^{6,7} se obtienen nuevos modelos basados en la interpolación de valores experimentales:

$$Z = \rho_o c_o \left[1 + 0,070 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} - j0,107 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,632} \right] \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{2\pi f}{c_o} \left[0,160 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} + j \left(1 + 0,109 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0,618} \right) \right] \quad (8)$$

Este modelo también presenta la limitación (6) pero se justifica en el momento de publicación porque es más fácil de realizar un programa de cálculo, ya que los exponentes de las potencias son los mismos. Los comentarios realizados en Delany & Bazley se pueden extrapolar a este modelo. Este modelo y el Delany & Bazley se obtuvieron en su momento para lanas de roca y lanas de vidrio (lanas minerales), aunque actualmente se pueden utilizar en otros materiales, bajo ciertas limitaciones.

Fórmulas de ajuste

Tal y como se ha mostrado con los modelos de Delany & Bazley o Miki, la obtención de la impedancia y la constante de propagación del material se basan en fórmulas como las siguientes:

$$R = \rho_o c_o (1 + A1 \cdot C^{-A2}) \quad (9)$$

$$X = -\rho_o c_o A3 \cdot C^{-A4} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c_o} A5 \cdot C^{-A6} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{2\pi f}{c_o} (1 + A7 \cdot C^{-A8}) \quad (12)$$

en las que se puede observar que los coeficientes desde A1 a A8 son los que se obtienen por un proceso de ajuste. C se conoce como frecuencia normalizada, y tiene como valor:

$$C = \frac{\rho_o f}{\sigma} \quad (13)$$

Otros autores como Garai & Pompoli⁹ o Dunn & Davern⁸ han desarrollado modelos con estas fórmulas para materiales como las lanas de poliéster o espumas. El hecho de que no todas las predicciones reflejaran de forma satisfactoria los valores reales del coeficiente de absorción para nuevos materiales, ha hecho que algunos autores, como Pompoli & Garai⁹ revisaran los valores de los coeficientes propuestos. Con esta filosofía aparecen nuevos modelos como los que se reflejan en la Tabla I.

Modelo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Delany & Bazley ⁵	0,0571	0,754	0,087	0,732	0,189	0,595	0,0978	0,700
Miki ^{6,7}	0,070	0,632	0,107	0,632	0,160	0,618	0,109	0,618
Dunn & Davern ⁸	0,114	0,369	0,099	0,758	0,168	0,715	0,136	0,491
Garai & Pompoli ⁹	0,078	0,623	0,074	0,660	0,159	0,571	0,121	0,530

Tabla I. Coeficientes propuestos por diferentes autores

Predicción del coeficiente de absorción sonora según la Norma UNE-EN 12354-6:2003¹⁶

En el actual borrador del Código Técnico de la Edificación, en su parte de Protección contra el Ruido (Documento Básico de Protección contra el ruido, DB-HR¹⁷), se referencia a la norma UNE-EN 12354-6:2003 para poder realizar predicciones del comportamiento de absorbentes acústicos. En ella se establece el procedimiento para el cálculo del coeficiente de absorción acústica a partir del valor de la resistencia específica al flujo¹⁸ y del espesor de los materiales. Utiliza como método base para materiales fibrosos el modelo de Delany&Bazley⁵ y Dunn & Davern⁸ para porosos. En esta normativa se calcula la impedancia normalizada del material absorbente colocado sobre una superficie acústicamente reflectante a partir de las siguientes expresiones:

$$Z' = Z'_c \times \coth(\Gamma \times e) \quad (14a)$$

$$Z' = Z_{lR} + j \times Z_{lI} \quad (14b)$$

siendo, Γ la constante de propagación del material absorbente, e , es el espesor de la muestra y Z'_c , es la impedancia característica del material normalizada a la impedancia del aire ($\rho_0 \cdot c$); ($Z'_c = R + jX$).

El coeficiente de absorción en incidencia normal se obtiene a partir de la relación:

$$\alpha_n = \frac{4Z_{lR}\rho_0c_0}{|Z_l|^2 + 2\rho_0c_0Z_{lR} + (\rho_0c_0)^2} \quad (15)$$

Las expresiones (14a), (14b) y (15), aplicadas a los modelos de Delany & Bazley⁵ o de Dunn & Davern⁸, son los que según esta norma, permiten obtener predicciones fiables, aunque se puede comprobar en las referencias, cómo diferentes autores discrepan al respecto.

FUNCIÓN DE ERROR

Como se ha visto en los apartados anteriores, para poder obtener el coeficiente de absorción en incidencia normal, se puede utilizar la expresión (15). Además, las expresiones (9) a (12) representan un modelo típico de ajuste, donde algunos autores han ajustado, a partir de (15) los coeficientes A_i , $i = 1, \dots, 8$ para un material en concreto, en un rango que suele ir entre 0.01 y 1 respecto al valor de la frecuencia normalizada C .

Según lo anterior, se puede definir la función del error cuadrática, ε , definida de la siguiente forma:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i})^2 \quad (16)$$

donde $\alpha_{n,i}$ representa el valor del coeficiente de absorción en incidencia normal, medido para un material absorbente elegido, a la frecuencia i -ésima y $\hat{\alpha}_{n,i}$ es la estimación del valor anterior realizada a partir de las ecuaciones (9) a (12). Para la minimización de la función de error es necesario realizar las siguientes derivadas parciales e igualarlas a cero.

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial A_i} = 2 \sum_{i=1}^N (\alpha_{n,i} - \hat{\alpha}_{n,i}) \frac{\partial \hat{\alpha}_{n,i}}{\partial A_i} = 0 \quad i = 1, \dots, 8 \quad (17)$$

Por tanto, las ecuaciones anteriores forman un sistema de 8 ecuaciones no lineales cuya resolución permite obtener el valor de los coeficientes A_i que minimizan el error cometido. La complejidad del sistema, sugiere la aplicación de método iterativo de resolución de sistemas no lineales.

RESULTADOS DEL AJUSTE

Los métodos iterativos utilizados en la obtención de soluciones se describen en las referencias ¹⁹ y ²⁰. Los mejores resultados se han obtenido mediante el método de Broyden y el método de Newton, aunque para el segundo ha sido necesario obtener el Jacobiano de las funciones no lineales definidas anteriormente e invertirlo, con lo que el coste computacional se eleva considerablemente. Respecto a la iteración inicial, dado que es un sistema de ecuaciones no lineal con 8 incógnitas, se ha decidido tomar los coeficientes de Delany & Bazley, que ya ajustan parte de los materiales absorbentes acústicos. La elección de la iteración inicial en este caso ha sido esencial. Al elegir coeficientes de modelos existentes, la convergencia hacia un único conjunto de coeficientes es clara, pero no converge con cualquier iteración inicial.

Para obtener los nuevos coeficientes ajustados, se han realizado diferentes mediciones en los laboratorios de acústica del Campus de Gandia, de la Universidad Politécnica de Valencia. Se han realizado ensayos según la UNE-EN ISO 10534-2:2002²¹ para la determinación del coeficiente de absorción [cuya expresión teórica equivalente se corresponde con la ecuación (10)] y se ha utilizado el método descrito por Ingard & Dear²² para la determinación de la resistencia al flujo de las muestras.

Se han ensayado muestras de lanas minerales. Se muestran los resultados para las siguientes muestras:

- Lana Mineral (LM), 40mm de espesor, 11900 rayls/m de resistencia al flujo, se utiliza para el aislamiento acústico en general.
- Lana Mineral Arena (Arena), 28 mm de espesor, 10100 rayls/m de resistencia al flujo, generalmente esta gama de lanas minerales se utiliza para el aislamiento a ruido de impacto.
- Panel de lana de vidrio (P vidrio), 40mm de espesor, 6000 rayls/m de resistencia al flujo, utilizado para disminuir la rigidez entre forjado y pavimento.
- Panel de lana de roca (P roca), 30 mm de espesor, 1800 rayls/m, también para aislamiento entre forjado y pavimento.
- Panel de lana de roca y lana de vidrio (P varios), de 25mm de espesor y 10900 rayls/m.
- Panel Plaver (Plaver), 38mm de espesor, 9200 rayls/m, se utiliza como panel absorbente acústico entre dos hojas de divisorios, mejora la eliminación de puentes acústicos.
- Panel Plaver Arena (Plaver Arena), 48mm de espesor, 8270 rayls/m, también se utiliza entre divisorios.
- Muestras de lanas de poliéster de diferentes densidades, entre 15 y 30 kg/m³ y espesores comprendidos entre los 15-30mm, para soluciones de aislamiento acústico y absorción en edificación. Han sido numeradas del 1 al 5 y los valores de resistencia al flujo y espesores se detallan a continuación:
 - Lana Poliéster 1: 30mm, 2700 rayls/m.
 - Lana Poliéster 2: 20mm, 1150 rayls/m.
 - Lana Poliéster 3: 36mm, 640 rayls/m.
 - Lana Poliéster 4: 16mm, 1130 rayls/m.
 - Lana Poliéster 5: 35mm, 2510 rayls/m.

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los resultados de las medidas realizadas según la norma UNE-EN ISO 10534-2.

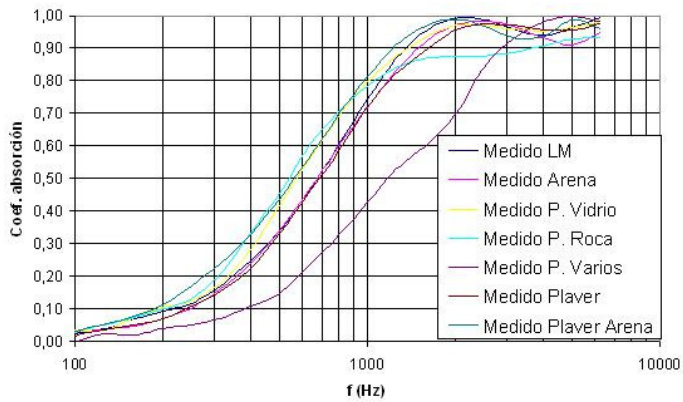


Figura 1. Coeficiente de absorción de lanas minerales medidas

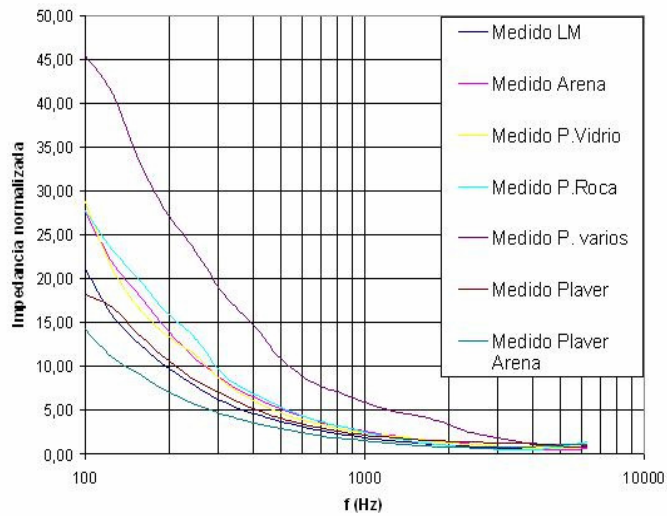


Figura 2. Impedancia de cierre de las lanas medidas

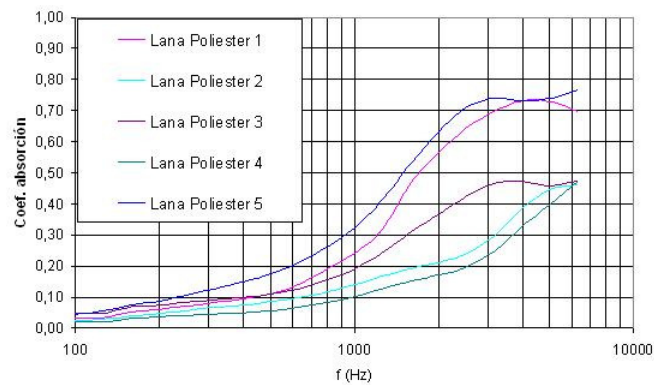


Figura 3. Coeficiente de absorción de lanas de poliéster medidas

Una vez medida la resistencia al flujo según el procedimiento descrito por Ingard & Dear²², se han retomado las ecuaciones descritas en el subapartado “Fórmulas de ajuste” y reajustado los parámetros A1 a A8, tomando como base la función de error del apartado “Función de error”.

Se muestran dos ajustes: el primero toma como datos de entrada Delany & Bazley (reajuste de 8 coeficientes, “ajuste 1”) y el segundo Miki, con A2 = A4 y A6 = A8 (reajuste de 6 coeficientes, “ajuste 2”). En la Tablas II y III se muestran los coeficientes obtenidos para lanas minerales. En la Tabla IV los coeficientes obtenidos para las lanas de poliéster.

Material	Espesor (mm)	Error medio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
LM	38,71	0,09	0,059	0,953	0,096	0,769	0,140	0,681	0,083	0,796
Arena	28,79	0,09	0,068	1,301	0,076	0,438	0,199	0,626	0,075	0,718
P. Vidrio	39,31	0,11	0,034	1,678	0,099	0,731	0,175	0,707	0,060	0,298
P. Roca	30,3	0,13	0,035	1,979	0,081	1,564	0,313	0,649	0,066	0,143
P. Varios	24,79	0,06	0,035	1,843	0,093	1,190	0,254	0,815	0,069	0,160
Plaver	37,22	0,09	0,026	1,383	0,065	0,441	0,257	0,296	0,068	0,192
Plaver Arena	47,44	0,09	0,021	1,401	0,060	0,369	0,278	0,266	0,080	0,165

Tabla II. Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas minerales. Iteración inicial: Delany & Bazley⁵

Material	Espesor (mm)	Error medio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
LM	38,71	0,04	0,068	0,648	0,103	0,648	0,168	0,603	0,114	0,603
Arena	28,79	0,07	0,025	0,821	0,097	0,821	0,210	0,656	0,083	0,656
P. Vidrio	39,31	0,13	0,004	0,313	0,065	0,313	0,152	0,136	0,040	0,136
P. Roca	30,3	0,25	0,004	0,244	0,032	0,244	0,248	0,128	0,042	0,128
P. Varios	24,79	0,09	0,005	0,270	0,059	0,270	0,307	0,035	0,048	0,035
Plaver	37,22	0,15	0,002	0,008	0,172	0,008	0,343	0,002	0,065	0,002
Plaver Arena	47,44	0,11	0,003	0,003	0,366	0,003	0,559	0,001	0,014	0,001

Tabla III. Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas minerales. Iteración inicial: Miki^{6,7}

Material	Espesor (mm)	Error medio	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Lana Poliéster 1	35,0	0,09	0,055	0,777	0,096	0,827	0,199	0,362	0,104	0,734
Lana Poliéster 2	25,0	0,06	0,047	0,944	0,155	0,795	0,189	0,607	0,116	0,894
Lana Poliéster 3	40,0	0,04	0,062	0,790	0,116	0,853	0,182	0,726	0,118	0,954
Lana Poliéster 4	20,0	0,06	0,067	0,857	0,140	0,928	0,189	0,990	0,119	1,038
Lana Poliéster 5	40,0	0,09	0,077	1,068	0,124	0,809	0,203	0,455	0,130	0,935

Tabla IV. Resultados de los coeficientes para el ajuste de lanas depoliéster. Iteración inicial: Delany & Bazley⁵

Por último, se han utilizado todos los datos de los ensayos, sin distinguir tipos de materiales para reajustar los coeficientes del A₁ al A₈, en la Tabla V aparecen los coeficientes obtenidos. El error medio en este caso es de 0,03.

<i>Modelo</i>	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
<i>Coefficientes reajustados</i>	0,060	0,863	0,088	0,764	0,194	0,589	0,100	0,683

Tabla V. Resultados de los coeficientes para el ajuste global de todos los datos.
Iteración inicial: Delany&Bazley⁵

En las Figuras 3 a 9 se muestran los resultados de los diferentes ajustes para lanas minerales. En color negro las curvas de las medidas reales y en rojo el ajuste con los coeficientes globales obtenidos. En las Figuras 10 y 11 se muestran los ajustes de impedancia de cierre para dos de los datos.

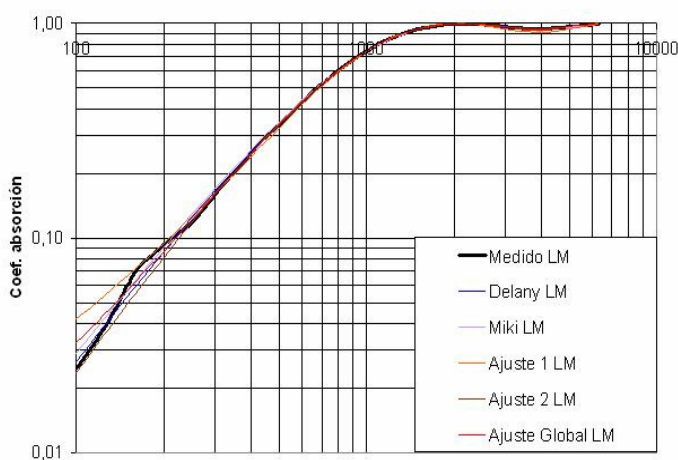


Figura 4. Coeficientes de absorción y ajustes para LM

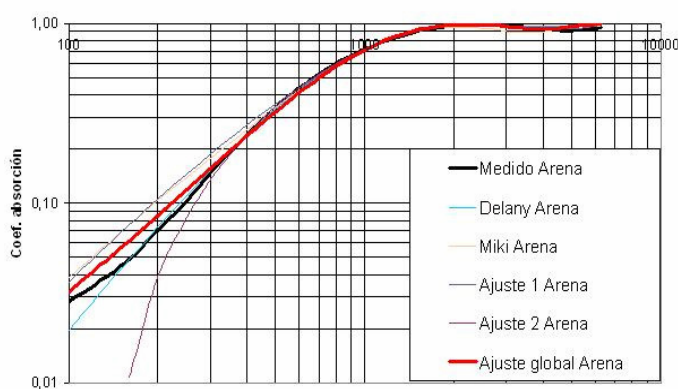


Figura 5. Coeficientes de absorción y ajustes para Arena

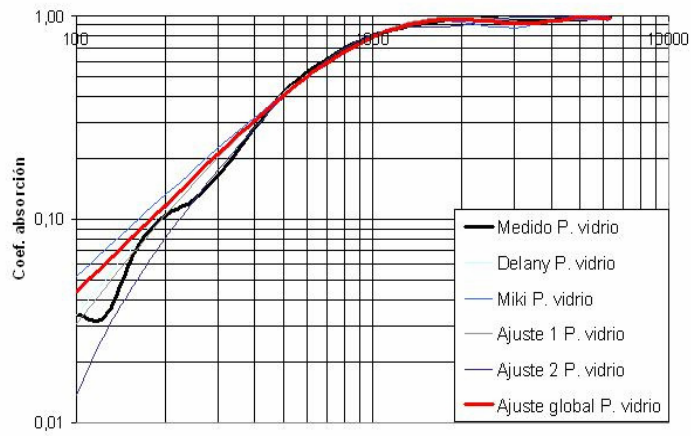


Figura 6. Coeficientes de absorción y ajustes para el panel de Lana de Vidrio

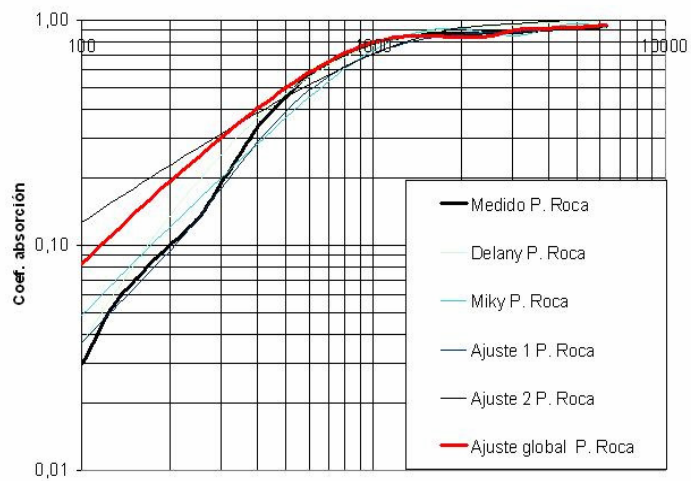


Figura 7. Coeficientes de absorción y ajustes para el panel de Lana de Roca

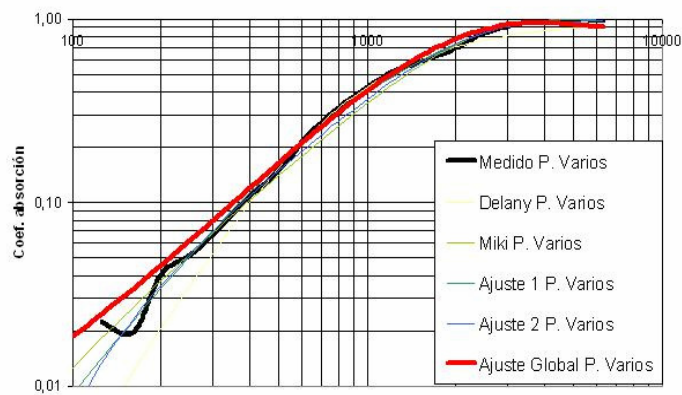


Figura 8. Coeficientes de absorción y ajustes para el panel de varias lanas minerales

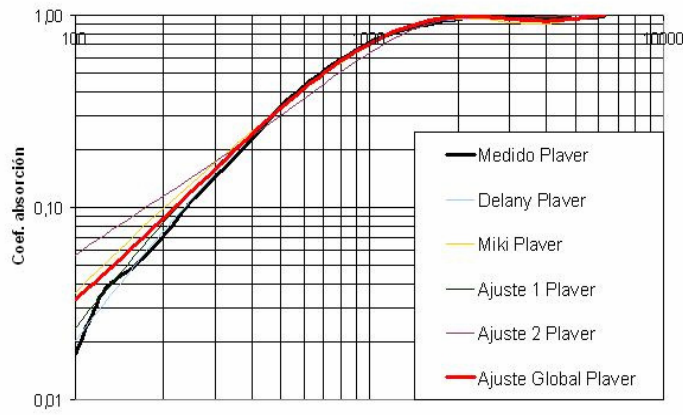


Figura 9. Coeficientes de absorción y ajustes para el plaver

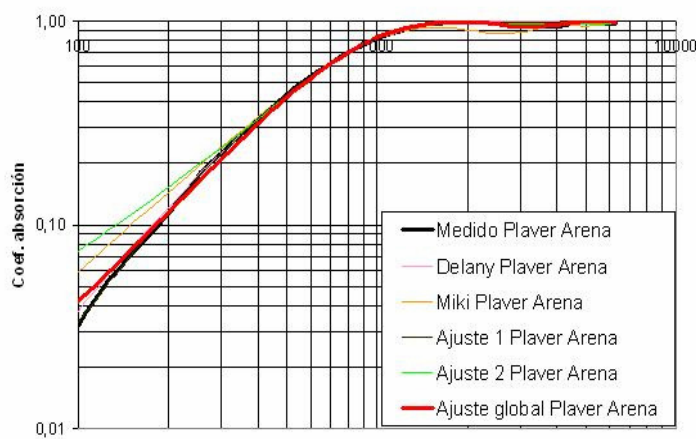


Figura 10. Coeficientes de absorción y ajustes para el plaver Arena

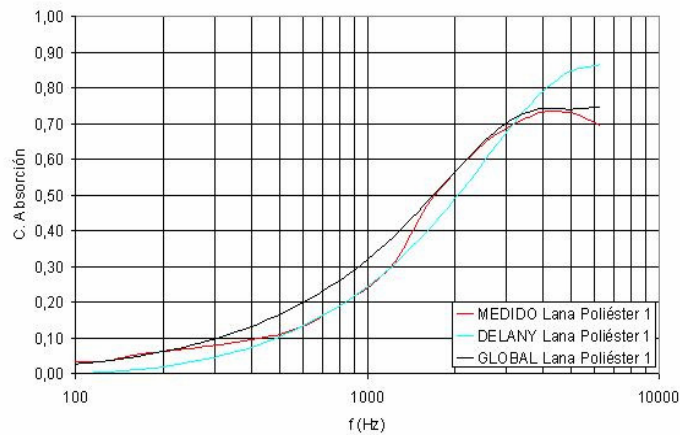


Figura 11. Coeficientes de absorción y ajustes para fibra de poliéster 1

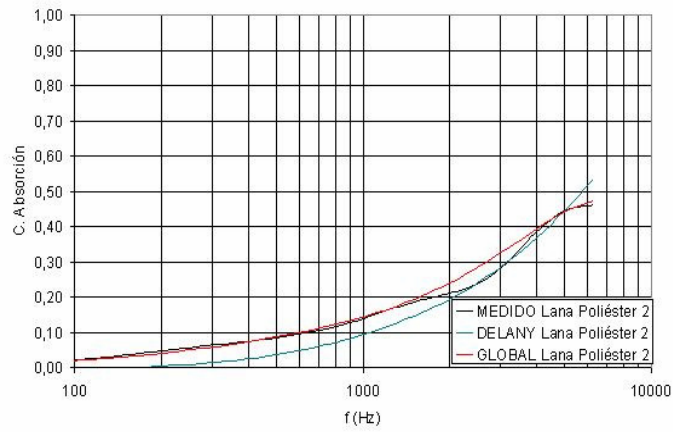


Figura 12. Coeficientes de absorción y ajustes para fibra de poliéster 2

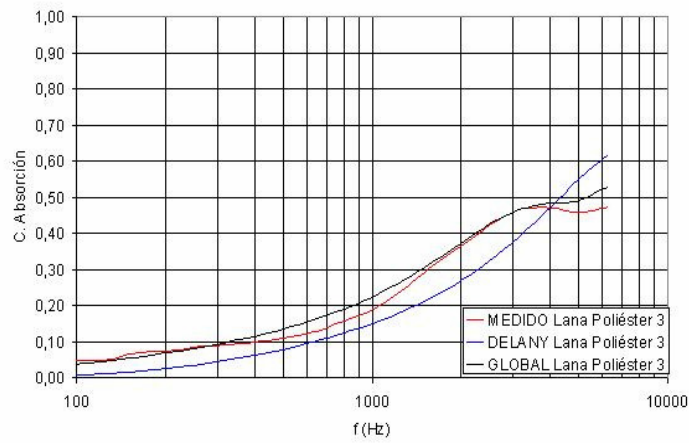


Figura 13. Coeficientes de absorción y ajustes para fibra de poliéster 3

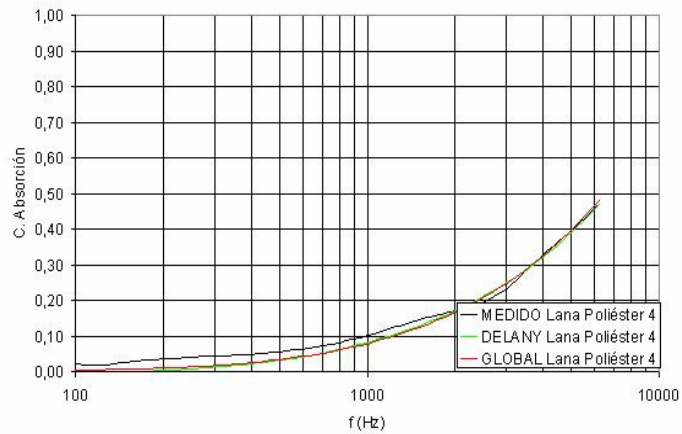


Figura 14. Coeficientes de absorción y ajustes para fibra de poliéster 4

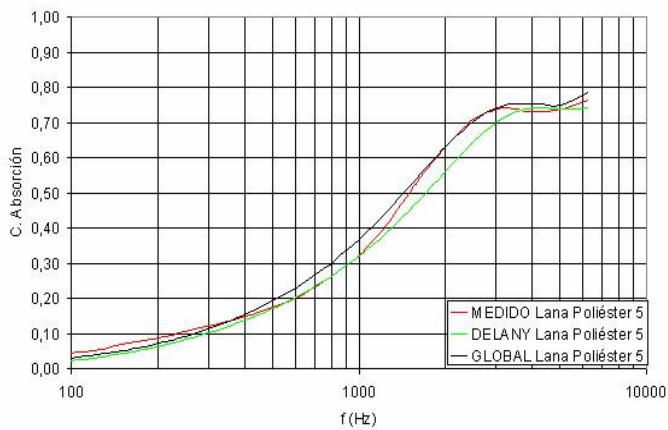


Figura 15. Coeficientes de absorción y ajustes para fibra de poliéster 5

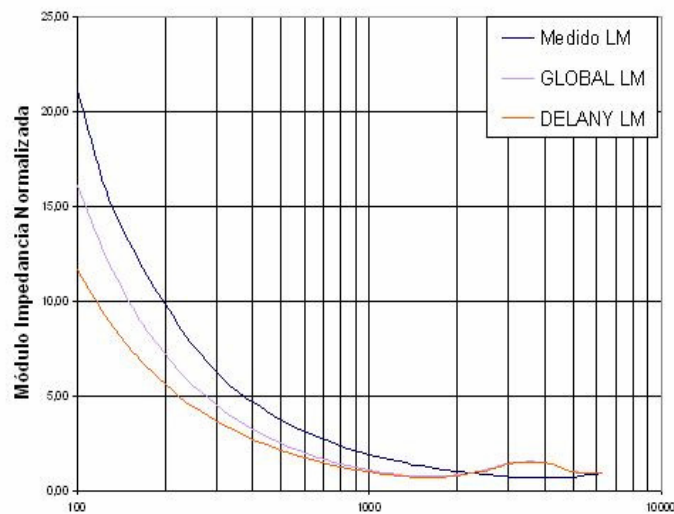


Figura 16. Módulo de la Impedancia y ajustes para LM

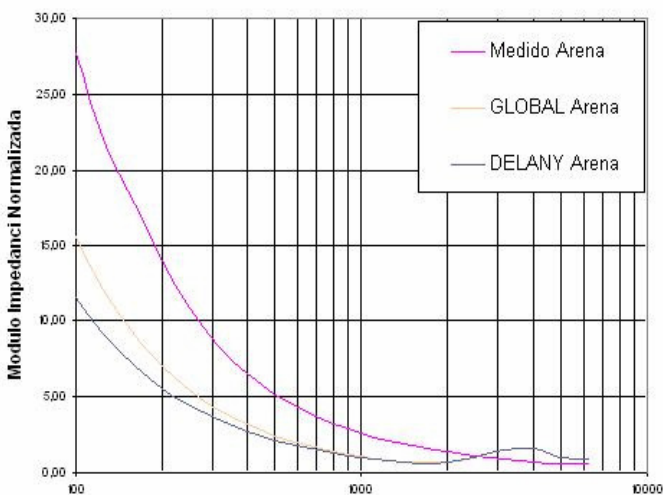


Figura 17. Módulo de la Impedancia y ajustes de Arena

ESTABILIDAD DEL MODELO RESPECTO A LOS ERRORES SISTEMATICOS

Uno de los problemas más habituales en el tratamiento de los materiales absorbentes, es que el espesor de la muestra, debido al recorrido del material desde su fabricación hasta el montaje sobre la superficie reflectante para hacer su función de material absorbente, y debido también a que en ensayos acústicos, el hecho de colocar la muestra a ensayar en bastidores y/o probetas suele comprimir el material, es uno de los parámetros con mayor indeterminación dentro de los valores de entrada que necesitamos conocer.

Como se ha podido observar, la resistencia al flujo, es un parámetro fundamental en estos modelos. Si vemos la estimación del error que se comete con las variables relacionadas en las expresiones de la (18) a la (21)

$$\Delta R = A2\left(\frac{R}{\rho_o c_o} - 1\right)\frac{\Delta C}{C} \quad (18)$$

$$\Delta X = A4X\frac{\Delta C}{C} \quad (19)$$

$$\Delta\alpha = A6\alpha\frac{\Delta C}{C} \quad (20)$$

$$\Delta\beta = A8\left(\frac{\beta}{\frac{2\pi f}{c_o}} - 1\right)\frac{\Delta C}{C} \quad (21)$$

El error cometido por cambios en la frecuencia normalizada se debe a cambios en la resistencia al flujo:

$$\frac{\Delta C}{C} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \quad (22)$$

Estos cambios se pueden asociar a cambios de densidad a partir de la relación de Bies-Hansen²³:

$$\sigma = \frac{K_2\rho_m^{K_1}}{d^2} \quad (23)$$

donde K_1 y K_2 son constantes que relacionan la densidad del material con la resistencia al flujo y d es el diámetro de la fibra. A partir de esta expresión se puede ver la relación entre errores relativos.

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = K_1 \times \frac{\Delta\rho_m}{\rho_m} \quad (24)$$

La tabla 5 muestra los valores de k_1 para el modelo descrito por Garai & Pompoli⁹ y para el modelo de Bies & Hansen²³. Como se puede comprobar, K_1 siempre toma valores mayores que la unidad¹¹.

Modelo	
Garai-Pompoli ⁹	1,404
Bies-Hansen ²³	1,53

Tabla VI. Valores de K_1 en dos modelos

Analizando (24), una incertidumbre del 10 % en la densidad del material, introduce una incertidumbre en la resistencia al flujo superior al 15 %. Se han medido en laboratorio incertidumbres en el valor de la densidad superiores al 30 % para lanas de roca poco densas ($30 - 40 \text{ kg/m}^3$), introduciendo para la resistencia al flujo valores de incertidumbre próximos al 50 %.

En (22), podemos observar que estos modelos están directamente relacionados con los cambios de resistencia al flujo, que se pueden producir por cambios de densidad (compresión del material en el transporte y otros) o por una mala introducción del parámetro. Hay que matizar que algunos autores no dan una resistencia al flujo sino un intervalo de confianza en el cual se puede encontrar.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes. Se ha realizado una revisión de los múltiples modelos que permiten predecir el comportamiento frecuencial, bajo ciertas condiciones, de diferentes materiales absorbentes acústicos.

Bajo la filosofía de la norma UNE-EN 12354-6, se ha realizado una campaña de medidas de lanas minerales, lanas de roca, lanas de vidrio y lanas de poliéster, que son las que se encuentran actualmente en el mercado. Las medidas han contemplado coeficiente de absorción, impedancia y resistencia al flujo.

A partir de las medidas y utilizando las fórmulas para el ajuste propuestas, se ha definido una función de error cuadrática a la que se ha ajustado el conjunto de mediciones realizadas. Como se pueden ver en los resultados, los nuevos coeficientes propuestos, o mantienen las condiciones de la UNE-EN 12354-6 o mejoran los resultados de los materiales. Por tanto, los nuevos coeficientes propuestos podrían utilizarse para modelar un conjunto de materiales más amplio. Además, se puede observar cómo las ecuaciones mejoran también la predicción de la impedancia, en comparación con la propuesta de la norma.

Como líneas de trabajo futuras, se marca el ampliar este estudio a más materiales. Están apareciendo materiales reciclados o materiales con base de fibras de plantas que se irán incorporando al mercado. Tampoco se descarta abordar otros modelos como los propuestos por Voronina, para mejorar las predicciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el ministerio de fomento (REF 80026/A04.)

REFERENCIAS

- 1 J.F. Allard, Y. Champoux, "New empirical equations for sound propagation in rigid frame fibrous materials", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **91**, N° 6, pp. 3346-3353, (1992).
- 2 K. Attenborough, "Acoustical characteristics of porous materials", *Physics Reports (Review Section of Physics Letters)*, Vol. **82**, N° 3, pp. 179-227, (1982).
- 3 K. Attenborough, "Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. **73**, N° 3, pp. 785-799, (1983).
- 4 N. Voronina, "Acoustical properties of fibrous materials", *Applied Acoustics*, Vol. **42**, pp. 165-174, (1994).
- 5 M. E. Delany, E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics*, Vol. **3**, pp. 105 -116, (1970).
- 6 Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials – modifications of Delany-Bazley models-", *Journal of the Acoustical Society Jpn (E)*, **11**, N° 1, pp. 19-24, (1990).

- 7 Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials-generalizations of empirical models", *Journal of the Acoustical Society Jpn (E)*, Vol. **11**, N^o 1, pp. 25-28, (1990).
- 8 I.P.Dunn, W.A. Davern, "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers", *Applied Acoustics*, Vol. **19**, pp. 321-334, (1986).
- 9 M. Garai, F. Pompoli, "A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications", *Applied Acoustics*, Vol. **66**, pp. 1383-1398, (2005).
- 10 X. Wang *et al.*, "Multi-stage regression analysis of acoustical properties of polyurethane foams", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **273**, pp. 1109-1117, (2004).
- 11 Y. Shoshani, Y. Yakubov. "Numerical assessment of maximal absorption coefficients for nonwoven fiberwebs", *Applied Acoustics*, Vol. **59**, pp. 77-87, (2000).
- 12 N. Voronina, "Improved empirical model of sound propagation through a fibrous material", *Applied Acoustics*, Vol **48**, N^o 2, pp 121-132, (1996).
- 13 N. Voronina, "An Empirical Model for Elastic Porous Materials, Applied Acoustics", Vol. **55**, N^o 1, pp 67-83, (1998).
- 14 N. Voronina, "An empirical model for rigid-frame porous materials with low porosity", *Applied Acoustics*, Vol. **58**, pp. 295-304, (1999).
- 15 N.N. Voronina, K.V. Horoshenkov, "A new empirical model for the acoustic properties of loose granular media", *Applied Acoustics*, Vol. **64**, pp. 415-432, (2003).
- 16 UNE-EN 12354-6:2004, Acústica en la edificación. "Estimación de las características de las edificaciones a partir de las características de sus elementos", parte 6, "Absorción sonora en espacios cerrados".
- 17 Documento Básico HR, de Protección frente al ruido, del Código Técnico de la Edificación, Ministerio de Vivienda, Dirección General de Arquitectura y Política de vivienda (Feb. 2007)
- 18 UNE-EN 29053:1994, Acústica. Materiales para aplicaciones acústicas. "Determinación para la resistencia al flujo de aire". (ISO 9053:1991).
- 19 G. Lindfield, J. Penny, *Numerical Methods Using Matlab*, Ellis Horwood L., (1995).
- 20 W.H. Press, S. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery, "*Numerical recipes in C*, Cambridge University Press, Cambridge, (1992).
- 21 UNE-EN ISO 10532-2:2002, "Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia", parte 2, "Método de la función de transferencia". (ISO 10534-2:1998).
- 22 K. U. Ingard & T. A. Dear, "Measurement of Acoustic Flow Resistance", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. **103**, N^o 4, (1985).
- 23 D.A. Bies, C.H. Hansen, "Flow resistance information for acoustical design", *Applied Acoustics*, Vol.**13**, pp.357-391, (1980).