

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LA LANA DE POLIÉSTER EN UNA CAJA ACÚSTICA

PACS: 43.55.Ev

Sainz-Pardo, Sara⁽¹⁾; Redondo, Javier⁽¹⁾; Picó, Rubén⁽¹⁾; Sanchís, Vicente⁽²⁾.

⁽¹⁾ Institut d'Investigació per a la Gestió Integrada de Zones Costaneres,
Universitat Politècnica de València,
C/ Paranimf 1,

46730 Grau de Gandia, Spain

⁽²⁾ PIEL, S.A. Políg. Ind. "Casa Felisio" s/n
46890 Agullent. Valencia. Spain

ABSTRACT

The aim of this study is to test the acoustic effect of the polyester fleece inside of a speaker from the acoustic parameters such as absorption coefficient and flow resistance. The effect produced by the filling of absorbent material factory is compared filled with polyester fleece. The box features and transducers are essential for good design. This work has been developed with acoustic materials from PIEL S.A. company, providing solutions and applications in various fields of acoustics.

RESUMEN

El objetivo de este estudio es comprobar el efecto acústico de la lana de poliéster en el interior de una caja acústica a partir de parámetros acústicos como el coeficiente de absorción y la resistencia al flujo. Se compara en una caja acústica comercial el efecto producido con relleno de material absorbente de fábrica y con relleno de lana de poliéster. Las características de la caja y de los transductores son imprescindibles para hacer un buen diseño. Este trabajo se ha desarrollado con materiales acústicos de la empresa PIEL S.A., aportando soluciones y aplicaciones en diversos campos de la acústica.

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

Durante los últimos años han aparecido en el mercado textil nuevos materiales que ayudan a solucionar diversas problemáticas en el campo de la acústica. Un claro ejemplo de estos materiales son los absorbentes basados en fibras textiles (lanas textiles), aplicables tanto en el campo del aislamiento acústico para mitigar el problema de las ondas confinadas dentro de particiones multicapa; como en el del acondicionamiento acústico para regular el tiempo de reverberación de un recinto y adecuarlo a un uso determinado. Por otro lado, también se emplean materiales textiles en el diseño de sistemas radiantes en electroacústica.

El objetivo de este trabajo es conocer el comportamiento acústico de la lana de poliéster en el interior de un sistema radiante o caja acústica mediante la determinación de distintos

parámetros acústicos como el coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica siguiendo la norma UNE-EN ISO 10534-1:1996 y la resistencia al flujo. Por otro lado se determinarán las características mecánicas del transductor dinámico con el que se trabaja y se hallará la respuesta en frecuencia de los altavoces que componen la caja acústica con diferentes configuraciones basadas en porcentajes de relleno de lana en el interior de la caja. Finalmente se calcula la impedancia de la caja para las diferentes configuraciones.

2 MATERIALES

Se dispone de lana de poliéster fabricada por la empresa PIEL S.A. y de una caja acústica comercial (43 x 67 x 34.5 cm) con material absorbente en su interior y dos transductores acoplados: un woofer modelo 15LN4 de 15" y un motor de compresión (tweeter) modelo M-10N de 1.5".

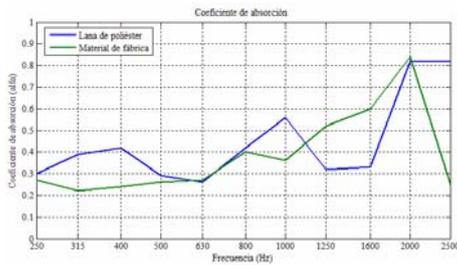
3 MÉTODOS APLICADOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

3.1 Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia mediante la norma UNE-EN ISO 10534-1:1996 Parte 1: Método del rango de onda estacionaria

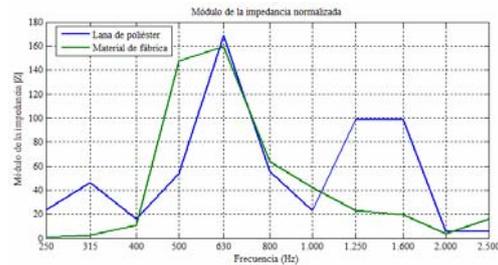
Se determina el coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia mediante la norma UNE-EN ISO 10534-1:1996: Método del rango de onda estacionaria para la lana de poliéster (Material 1) y para el material absorbente que recubría el interior de la caja acústica (Material 2).

Para realizar el montaje se coloca una muestra de 25.1 cm de diámetro en el extremo de un tubo de Kundt (1.3 m de longitud y 8 cm de diámetro con paredes de metacrilato de 2 mm de grosor) frente a un altavoz en la pared opuesta al tubo. Para realizar las medidas se introduce una sonda microfónica entubada manualmente a través de la muestra. Este hecho introducirá una desviación respecto a la norma. Se sitúa la muestra en el plano de referencia que es donde se introduce la sonda. El altavoz se conecta a la tarjeta de sonido del PC, donde un programa de audio nos permitirá medir los valores de tensión que se emiten y nos proporcionará la señal de salida que es la que emitirá el altavoz. Esta señal será un tono de frecuencia igual a cada uno de los tercios de octava que se consideren. La salida de la sonda microfónica se conecta a la misma tarjeta de sonido y sirve como entrada al programa de audio.

A partir de los datos del tubo y de acuerdo con las ecuaciones indicadas en la norma se realiza el cálculo de las frecuencias máximas y mínimas. En el intervalo entre ambas deben realizarse las mediciones para que los resultados obtenidos sean válidos. A partir del tubo de ensayo seleccionado se eligen valores de frecuencias, en tercios de octava, entre $f_{\text{superior}} \leq 2125$ Hz y $f_{\text{inferior}} \geq 192$ Hz; y se obtienen los puntos donde la presión es mínima y máxima para frecuencia. Para ello se genera un tono de cada frecuencia y se desplaza la sonda desde la posición inicial hasta el punto donde se encuentra el primer mínimo y el primer máximo. A partir de los valores obtenidos para cada frecuencia de estudio y la distancia desde la posición inicial hasta el punto de interés se calcula con las fórmulas indicadas en la norma el coeficiente de absorción y el módulo de la impedancia normalizada de cada material (Gráfica 1 y Gráfica 2).



Gráfica 1 Coeficiente de absorción de los materiales



Gráfica 2 Módulo de la impedancia normalizada de los materiales

3.2 Caracterización de materiales fibrosos: Resistencia al flujo, método Ingard & Dear

Los materiales porosos están formados por entramados de poros o canalizaciones conectados entre sí. En estos canales o cavidades pequeñas, las pérdidas de energía por viscosidad transforman parte de la energía acústica en calor, y éste es disipado. La absorción de estos materiales depende en gran parte de la frecuencia de la onda acústica, siendo pequeña para bajas frecuencias y aumentando con el espesor del material. Un material poroso se puede caracterizar por tres parámetros: la porosidad, que es la fracción de espacio vacío dentro del material con respecto al volumen total de éste; la resistencia al flujo del aire, que mide la dificultad de una corriente de aire para fluir a través del material por unidad de espesor de éste; y el factor de estructura, que mide la cantidad de espacio no útil, como son los poros perpendiculares y paralelos al flujo del sonido incidente.

En estos ensayos se obtiene el valor de la resistencia al flujo del aire (σ), la resistencia al flujo específica (o por nivel de espesor). A partir de estos valores se obtiene la Impedancia Característica Compleja y la Constante de Propagación Compleja de cada uno de los materiales de ensayo mediante el modelo de Delany & Bazley.

La medida de la resistencia al flujo se realiza mediante el método experimental de Ingard & Dear en el tubo de impedancia. Se toman nota de los datos de la Tabla 1 para realizar el ensayo en los dos materiales.

I1 (cm)	I Material 1(cm)	I Material 2 (cm)	L1 (cm)	L2 (cm)	D (cm)
85	2	1	80.4	81.4	4.2

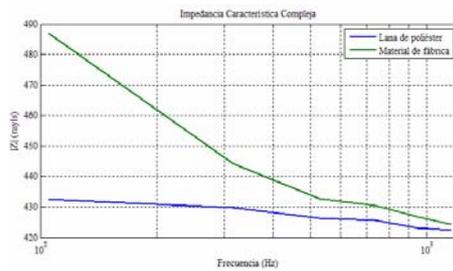
Tabla 1 Datos de los materiales de ensayo y del tubo de impedancia

La configuración permite el cálculo de la resistencia específica al flujo para las frecuencias de 100, 300, 500, 700, 900 y 1100 Hz. Midiendo los niveles de presión sonora a estas frecuencias el valor de la resistencia al flujo (σ) es:

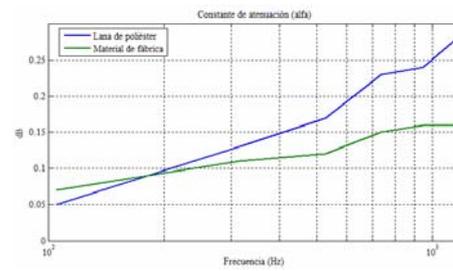
$$\sigma = \rho_0 c_0 10^{\frac{L_p 1 - L_p 2}{20}} \quad (1)$$

Donde ρ_0 es la densidad del aire, c_0 la velocidad de propagación en el aire, L el espesor de la muestra y L_{p1} y L_{p2} los niveles de presión medidos en los puntos 1 y 2 respectivamente.

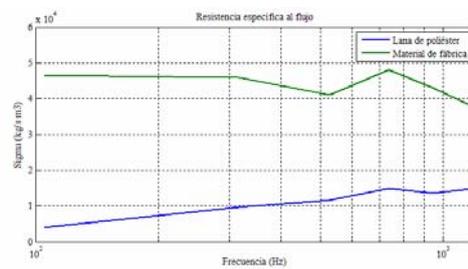
Si el valor anterior se divide por el espesor del material, se obtiene el valor de la resistencia específica al flujo. Una vez calculada la resistencia específica al flujo, se puede hallar la impedancia característica compleja y la constante de propagación compleja de los materiales.



Gráfica 3 Módulo de la Impedancia Característica Compleja



Gráfica 4 Parte real de la Constante de Propagación Compleja



Gráfica 5 Resistencia al Flujo de los materiales

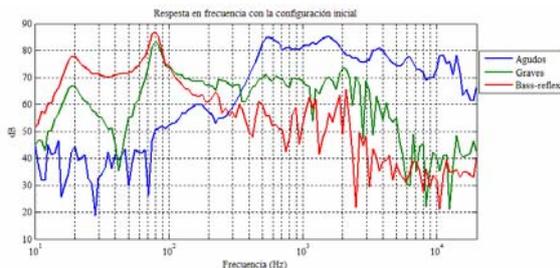
La constante de atenuación (α) de la lana de poliéster es superior que en el material absorbente de fábrica a altas frecuencias. Esto se traduce en un comportamiento más absorbente de la energía acústica desde 200 Hz hasta 1000 Hz aproximadamente. La resistencia al flujo (σ) es inferior en la lana de poliéster en toda la banda de frecuencias de estudio, comparada con el material de fábrica. Al impedir el paso del aire a través de ésta la energía acústica pasa en menor medida. La resistencia al flujo promedio será de 11.4×10^3 (Kg/sm³) para la lana de poliéster y de 43.7×10^3 (Kg/sm³) para el material de fábrica.

3.3 Respuesta en frecuencia de los altavoces

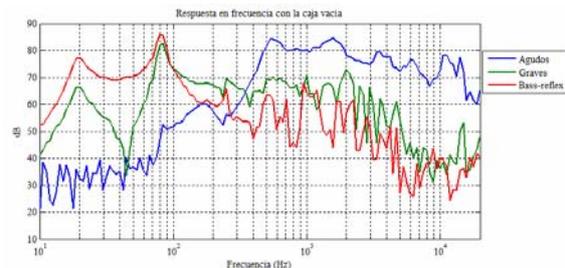
Se mide la respuesta en frecuencia de cada uno de los altavoces y se evalúa el efecto de colocar diferentes cantidades de lana de poliéster en el interior de la caja acústica. La respuesta en frecuencia de altavoces se debe obtener idealmente en condiciones de campo lejano y campo libre. El procedimiento estandarizado para realizar estas mediciones es mediante un micrófono situado a 1 m de la caja acústica en el eje del altavoz y en una cámara anecoica. Sin embargo, no se han realizado las medidas en una cámara anecoica, resultando de interés la obtención de parámetros en condiciones de campo difuso (siempre que se cumpla la condición de campo libre simulado).

La razón principal por la que se recubren las paredes interiores de la caja acústica con material absorbente es para eliminar reflexiones en el interior, ya que éstas pueden derivar en modos propios que afecten al sonido reproducido por el sistema completo (transductores + caja acústica). Además, el volumen aparente de la caja aumenta, compensando el volumen ocupado por los altavoces en el interior de la caja acústica. Se debe tener en cuenta la colocación del material en el interior de la caja, por ejemplo si se revisten paredes paralelas o no. El efecto de eliminación de modos propios aumenta si las paredes recubiertas no son paralelas. En la caja bajo estudio las paredes no son paralelas, evitando con el diseño de la caja la formación de modos propios. Al material ha de estar bien sujeto a las paredes interiores de la caja para evitar efectos indeseados en baja frecuencia.

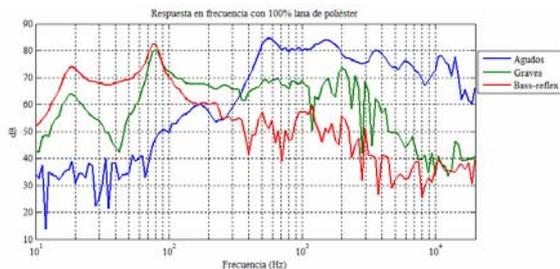
Se han realizado ocho configuraciones: la configuración inicial, es decir, la caja acústica con 0.855 m² del material absorbente de fábrica; la caja acústica vacía; la caja acústica con 0.855 m² de lana de poliéster; la caja acústica rellena por el 80% de lana de poliéster (0.684 m²); por el 50% (0.4275 m²); por el 33% (0.285 m²); por el 66% (0.57 m²); y por el 20% (0.171 m²). Tras realizar las diferentes configuraciones y seguir la metodología recomendada se obtiene la respuesta en frecuencia. Se muestran los resultados de las configuraciones 1, 2, 3 y 5.



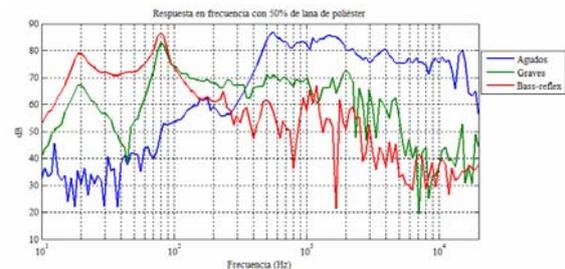
Gráfica 6 Respuesta en frecuencia total de la configuración inicial



Gráfica 7 Respuesta en frecuencia total con la caja acústica vacía



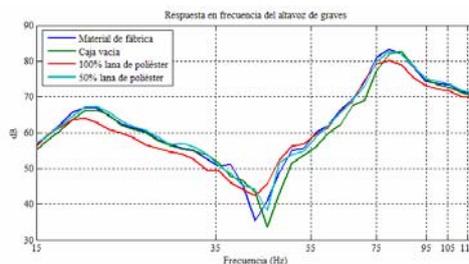
Gráfica 8 Respuesta en frecuencia total con la caja acústica rellena 100%



Gráfica 9 Respuesta en frecuencia total con la caja acústica rellena 50%

La Gráfica 6 es la respuesta en frecuencia de referencia, pues es la respuesta que tiene el sistema con el material absorbente de fábrica. Se observa como al superponer las 3 respuestas en frecuencia la respuesta es bastante plana dentro de la banda audible. La respuesta de la Gráfica 7 es similar a la de la configuración inicial en toda la banda de frecuencias. En la Gráfica 8 se puede observar cómo se atenúan los picos en las frecuencias de resonancia a bajas frecuencias. También se observa una pequeña atenuación a frecuencias medias. En la Gráfica 9 se observa como con la mitad de la cantidad de lana de poliéster en el interior de la caja acústica el comportamiento es similar a la respuesta en frecuencia observada en la configuración inicial.

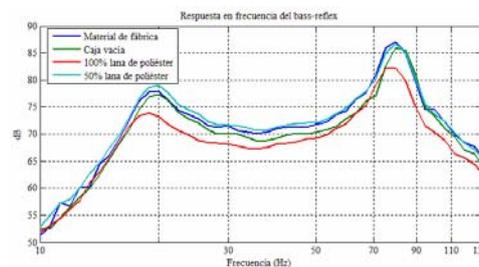
Se analiza el comportamiento de los transductores acoplados a la caja acústica con las configuraciones anteriores. La respuesta del altavoz de agudos no sufre variaciones significativas al cambiar de configuración. El transductor de graves tiene una respuesta con una envolvente similar en todo el rango de frecuencias de trabajo, pero se aprecian pequeñas diferencias de nivel donde se encuentran las frecuencias de resonancia (Gráfica 10).



Gráfica 10 Detalle de la respuesta en frecuencia del altavoz de graves

En la Gráfica 10 el primer pico corresponde a la frecuencia de resonancia del altavoz y el segundo corresponde con la frecuencia de resonancia de la caja. En todas las configuraciones realizadas el primer pico tiene un valor muy próximo en frecuencia, aunque el nivel se atenúa cuando la caja tiene entre 80 y el 100% cubierto con lana de poliéster. También se observa como el nivel con el 50% de la lana de poliéster es similar al nivel obtenido con la configuración inicial y con la caja vacía. En el segundo pico si se puede ver un claro desplazamiento de la frecuencia de resonancia entre diferentes configuraciones, además de una atenuación similar que la observada en el primer pico de la respuesta en frecuencia.

En la respuesta en frecuencia del sistema bass-reflex se observan diferencias de nivel en el intervalo de frecuencias de trabajo (Gráfica 11).



Gráfica 11 Detalle de la respuesta en frecuencia del sistema bass-reflex

Hay un refuerzo en las frecuencias de trabajo, comparándolo con la gráfica obtenida con el altavoz de graves. En cambio el patrón que se muestra para cada una de las configuraciones coincide con el anterior, es decir, mayor atenuación para las configuraciones con mayor cantidad de lana de poliéster y un ligero desplazamiento en la frecuencia de resonancia correspondiente a la caja acústica.

3.4 Impedancia de la caja

Se describe el comportamiento de la caja acústica en cada configuración. La impedancia de la caja está compuesta por una parte resistiva y por una parte reactiva.

$$Z_{AB} = R_{AB} + jX_{AB} = R_{AB} + j \left(\omega M_{AB} - \frac{1}{\omega C_{AB}} \right) \quad (2)$$

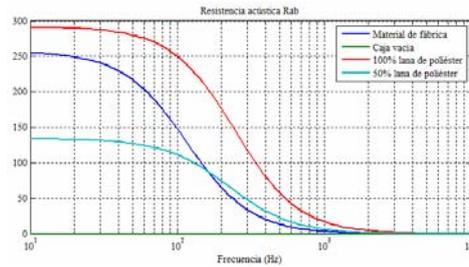
La impedancia varía si la caja acústica está revestida o no de material absorbente. Siendo $R_{AB} = 0$ si está vacía y siguiendo la fórmula (3) si está revestida.

$$R_{AB} = \frac{R_{AM}}{\omega^2 C_{AB}^2 R_{AM}^2 + \left(1 + \frac{V_B}{\gamma N_M} + \frac{V_B^2}{\gamma^2 V_M^2} \right)} \quad (3)$$

$$R_{AM} = \frac{R_F}{3S_M} \quad (4)$$

Siendo R_F la resistencia acústica específica por unidad de revestimiento, S_M la superficie de revestimiento, V_B el volumen del recinto y V_M el volumen del revestimiento.

Tras realizar los cálculos descritos se representan los resultados en la Gráfica 12.

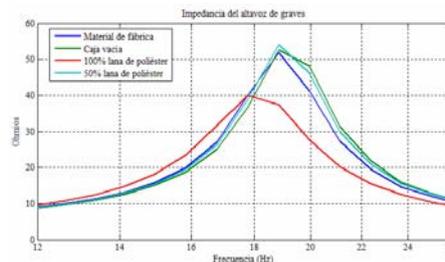


Gráfica 12 Resistencia acústica de la caja con las diferentes configuraciones

A altas frecuencias la resistencia tiende a cero independientemente de la configuración realizada. La resistencia acústica de la caja afecta a bajas y medias frecuencias.

Los valores obtenidos en el cálculo de la reactancia acústica en todas las configuraciones son muy similares, debido a que la masa acústica de la caja es la misma y la compliancia acústica varía muy poco. Al contrario que en el caso de la resistencia acústica, el intervalo de frecuencias donde la reactancia del sistema predomina es a altas frecuencias.

En la representación del módulo de la impedancia del altavoz de graves se observa una segunda resonancia. Ésta se debe al introducir un nuevo elemento en el sistema, es decir, al medir la impedancia del altavoz en la caja. Esta resonancia se sitúa a 79.43 Hz. En la Gráfica 13 se representa la frecuencia de resonancia del módulo de la impedancia del conjunto del altavoz de graves y la caja acústica con las configuraciones más importantes.



Gráfica 13 Detalle del módulo de la impedancia del altavoz de graves

La resonancia se atenúa al rellenar la caja con la lana de poliéster, siendo la máxima diferencia de 15 Ω aproximadamente. Con el 50% de lana de poliéster se obtiene el mismo valor del módulo de la impedancia tanto si la caja estuviera vacía como si la caja contuviera el material absorbente de fábrica. Se observa un ligero desplazamiento en la frecuencia de resonancia al introducir la misma cantidad de lana de poliéster que del material de fábrica, es decir, 0.855 m².

El desplazamiento será mínimo ya que al realizar el diseño de cajas y tratarse de un sistema activo se tiene previsto que el elemento que menos afecta al módulo de la impedancia es el material con el que se recubre la caja acústica.

El módulo de la impedancia del altavoz de agudos es similar en todas las configuraciones, independientemente de la cantidad de material en el interior de la caja acústica.

4 CONCLUSIONES

Del estudio realizado conforme a la norma UNE-EN ISO 10534-1:1996 Parte 1 el material absorbente que estaba incluido en la caja acústica tiene un coeficiente de absorción que aumenta con la frecuencia, pero inferior a la lana de poliéster en el resto de la banda de frecuencias. El coeficiente de absorción de la lana de poliéster no tiende a ser constante. Se puede determinar que la lana de poliéster absorbe más energía acústica que el material

absorbente de fábrica. En cuanto al módulo de la impedancia normalizada, se diferencian tres zonas: frecuencias bajas, medias y altas. La impedancia tiene un comportamiento similar en ambos materiales a frecuencias bajas y medias, a altas frecuencias con la lana de poliéster se acentúa.

La resistencia al flujo (σ) es inferior en la lana de poliéster en toda la banda de frecuencias de estudio, comparada con el material absorbente de fábrica con unos valores promedio de 11.4×10^3 (Kg/sm³) para la lana de poliéster y de 43.7×10^3 (Kg/sm³) para el material de fábrica.

La respuesta en frecuencia con la configuración inicial y con la caja vacía es bastante plana dentro de la banda audible. Cuando se introduce la misma cantidad de lana de poliéster que del material de fábrica se atenúan los picos de baja y media frecuencia. Con la mitad de la cantidad de lana de poliéster en el interior de la caja acústica el comportamiento es similar a la respuesta en frecuencia observada en la configuración inicial.

Tras el estudio de la resistencia acústica de la caja se puede afirmar que al introducir lana de poliéster en la caja acústica el comportamiento es más constante con la frecuencia, aumentando la resistencia a medida aumentamos la cantidad de lana en el interior.

Al estudiar la configuración con el altavoz de graves se observa como la resonancia se atenúa al rellenar la caja con la lana de poliéster. Con el 50% de lana de poliéster se obtiene el mismo valor del módulo de la impedancia que si la caja estuviera vacía o si la caja contuviera el material absorbente de fábrica.

5 REFERENCIAS

- J. Ramis, J. Alba, J.A. Martínez y V. Espinosa, "Transductores dinámicos" Departamento de Física Aplicada. Editorial UPV. Ref.: 2002.635.
- J. Alba, J. Ramis, J. Redondo y V. Sanchís, "Aplicaciones acústicas de lanas textiles". Tecniacústica 2004. Paper ID: 032/p.1.
- J. Alba, J. Redondo, J. Ramis y V. Sanchís, "Características acústicas de configuraciones con napas textiles". Tecniacústica 2003.
- J. Alba, J. Redondo, J. Ramis y V. Sanchís, "Soluciones al ruido reverberante excesivo basadas en fibras textiles". Tecniacústica 2004. Paper ID: 031/p.1.
- E. Juliá, "Modelización, simulación y caracterización acústica de materiales para su uso en acústica arquitectónica" Tesis doctoral. Departamento de de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Politécnica de Valencia. 2008.
- Norma UNE-EN ISO 10534-1: "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia."