



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -
TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE FIBRAS NATURALES FONOABSORBENTES MEDIANTE UNA TÉCNICA EXPERIMENTAL DE DOS FUENTES CON EXCITACIÓN SIMULTÁNEA

PACS: 43.50.Gf, 43.20.Mv, 43.20.Bi

Pedrosa Sánchez, Ana M.; Sánchez Orgaz, Eva M.; Denia, Francisco D.; Fuenmayor Fernández, F. Javier
Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de València
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia, España
Tel: +34 963877007 Ext: 76224
Fax: +34 963877659
Email: anpedsan@dim.upv.es; evsncor@upvnet.upv.es; fdenia@mcm.upv.es; ffuenmay@mcm.upv.es

Palabras Clave: Fibras naturales, medida experimental, excitación simultánea, dos fuentes, material absorbente

ABSTRACT

Natural fibres can be a suitable alternative for traditional synthetic materials used in noise control systems. Such fibres are not pollutant neither harmful for human health. They can also be obtained from industrial scrap.

In this work, coconut and sisal fibres are characterized by means of a technique based on the simultaneous two source excitation method. The methodology has been previously set up for synthetic materials. The results obtained will be compared with theoretical models for their validation. In addition, a prototype of a noise control device (silencer) will be constructed and its transmission loss will be measured.

RESUMEN

Las fibras naturales se presentan como una alternativa adecuada a los tradicionales materiales sintéticos empleados en sistemas de reducción y control de ruido. Dichas fibras no son contaminantes ni perjudiciales para la salud, y además se pueden obtener de productos de desecho industrial.

En este trabajo se van a caracterizar experimentalmente fibras de coco y sisal mediante una técnica basada en el método de las dos fuentes con excitación simultánea, previamente puesta a punto para materiales sintéticos. Los resultados obtenidos se compararán con modelos teóricos para su validación. Además, se construirá un prototipo de dispositivo de control de ruido (silenciador) y se obtendrá su índice de pérdida de transmisión.

1. INTRODUCCIÓN

Según la Organización Mundial de la Salud, una de las formas de contaminación ambiental más extendida en la actualidad es la originada por el ruido, ya que tiene efectos perjudiciales sobre la salud [1]. Por ello es fundamental la utilización de dispositivos de control de ruido como es el caso de los silenciadores [2], [3].

Los sistemas de acondicionamiento de los edificios constan de ventiladores, conductos, cambios de sección, así como de compuertas y otros elementos que permiten la renovación del aire generando ruido durante el proceso. Por este motivo, es necesario dotarlos de elementos de control de ruido y dispositivos tales como silenciadores, que reduzcan los niveles sonoros producidos [3]-[5]. Tradicionalmente, se han utilizado silenciadores disipativos que contienen materiales sintéticos, como fibra de vidrio o lana de roca [2], [3]. No obstante, este tipo de fibras puede ser contaminante debido al arrastre producido por el flujo de aire [6]-[9]. Por esta razón, parece interesante la utilización de fibras de origen natural en este tipo de sistemas.

Las fibras naturales consideradas en este trabajo poseen la ventaja de no ser contaminantes para el medio ambiente, ni perjudiciales para la salud humana. Además, se pueden utilizar fibras provenientes de desechos industriales que de otro modo se desaprovecharían. Otra ventaja adicional es el potencial aumento de los ingresos en los países productores de este tipo de fibras [10], [11].

En el presente trabajo se caracteriza la respuesta acústica de la fibra de coco y una mezcla de coco-sisal, como posibles alternativas a las fibras sintéticas. Las medidas experimentales se han llevado a cabo mediante el método de las dos fuentes con excitación simultánea [12]. Este método, que se ha empleado en trabajos previos para obtener el índice de pérdidas por transmisión (*Transmission Loss* – TL) de silenciadores de escape [13], permite llevar a cabo dos ensayos independientes de forma simultánea. Los resultados experimentales, se comparan con un modelo teórico válido para fibras sintéticas que anteriormente ha sido ajustado para algunas fibras naturales. Finalmente se construirá un silenciador disipativo con fibra de coco y se obtendrá experimentalmente su TL que será comparado con los resultados obtenidos de forma numérica utilizando un programa de elementos finitos (desarrollado en el Centro de Investigación en Ingeniería Mecánica (CIIM) de la Universitat Politècnica de València [6], [8].

2. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DEL MEDIO

El fenómeno de propagación acústica en conductos sin flujo medio, está gobernado por la ecuación de ondas [14]. Para un conducto paralelo al eje x resulta:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (1)$$

Donde p es la presión acústica, c es la velocidad del sonido en el medio y t el tiempo. Asumiendo un comportamiento armónico, la solución a la ecuación de ondas es

$$p(x, t) = P^+ e^{j(\omega t - kx)} + P^- e^{j(\omega t + kx)} \quad (2)$$

Siendo P^+ la amplitud de la onda que se desplaza en sentido ascendente de la coordenada espacial (progresiva), P^- la amplitud de la onda regresiva (sentido descendente de x), ω la frecuencia angular y k el número de onda que se define como $k = \omega/c$.

Por otro lado, la ecuación de equilibrio dinámico [14], relaciona el campo de presión con la velocidad acústica:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del medio. Así, la velocidad acústica resulta

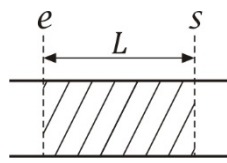
$$u(x, t) = \frac{1}{\rho c} (P^+ e^{j(\omega t - kx)} - P^- e^{j(\omega t + kx)}) \quad (4)$$

En términos de flujo másico v , para un conducto de sección transversal S , la ecuación anterior se transforma en

$$v(x, t) = \frac{S}{c} (p^+ e^{j(\omega t - kx)} - p^- e^{j(\omega t + kx)}) \quad (5)$$

A la relación entre la velocidad del sonido y el área transversal se le conoce como impedancia característica del conducto $Y = c/S$.

Es habitual representar el comportamiento acústico de un sistema mediante su matriz de transferencia. En el caso de un conducto recto de longitud L , de paredes rígidas, teniendo en cuenta la Figura 1 y las ecuaciones (2) - (5), resulta:



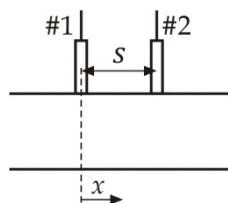
$$\begin{Bmatrix} p \\ v \end{Bmatrix}_e = \begin{bmatrix} \cos(kL) & Y \operatorname{sen}(kL) \\ \frac{\operatorname{sen}(kL)}{Y} & \cos(kL) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ v \end{Bmatrix}_s \quad (6)$$

Figura 1. Conducto de paredes rígidas.

El objetivo principal de este trabajo es la obtención experimental del número de onda k y la impedancia Y de materiales absorbentes.

2. SISTEMA EXPERIMENTAL

El sistema experimental empleado en el presente trabajo está basado en el método de los dos micrófonos, que permite diferenciar las componentes progresiva y regresiva de la onda de presión en un medio a partir de la medida de la presión acústica en dos posiciones arbitrarias conocidas. El montaje experimental está reflejado en la Figura 2 y el sistema de ecuaciones (7) es resoluble si se conoce el número de onda del medio k .



$$\left. \begin{aligned} p(x=0) &= P^{\#1} = P^+ + P^- \\ p(x=s) &= P^{\#2} = P^+ e^{-jks} + P^- e^{jks} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Figura 2. Método de los dos micrófonos.

Es una técnica experimental clásica [15] que se sigue empleando con éxito en la actualidad [12] y se ha adaptado para la obtención de todo tipo de parámetros acústicos. Para la obtención experimental de las propiedades acústicas k e Y , es necesario llevar a cabo dos ensayos independientes. Tales ensayos se pueden conseguir cambiando la posición del excitador acústico, lo que da origen al método de las dos fuentes [16], o modificando las características del sistema aguas abajo de la muestra, como en el método de las dos cargas [14]. En anteriores trabajos de los autores se ha desarrollado e implementado con éxito una técnica experimental en la que los dos ensayos se llevan a cabo simultáneamente [12]. Asimismo, en otros trabajos previos [13] se ha obtenido la matriz de transferencia y el índice de pérdidas por transmisión de silenciadores de escape. La obtención de las propiedades acústicas objeto del presente estudio, se hace a partir de los términos de la matriz de transferencia de un sistema formado por un tramo de conducto de aire de longitud L_U , seguido de una probeta con el material absorbente de longitud L y un tramo final de conducto de aire de longitud L_D . El sistema experimental completo está representado en la Figura 3.

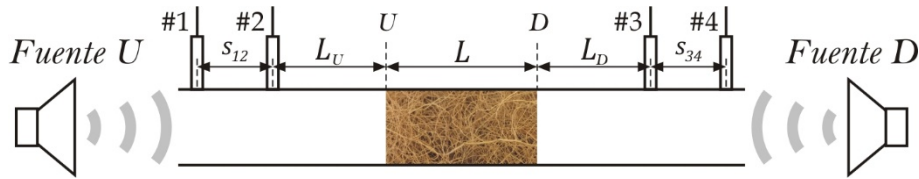


Figura 3. Sistema experimental.

Determinada experimentalmente la matriz de transferencia entre las secciones de los micrófonos 2 y 3 ($[T]_{\#2-\#3}$), la extracción de la matriz de transferencia del material absorbente $[T]_{Absorbente}$ se hace de forma sencilla teniendo en cuenta que para un conjunto de elementos acústicos dispuestos en cascada, la matriz de transferencia completa es igual a la multiplicación ordenada de la matriz de transferencia de cada uno de los sistemas como sigue

$$\begin{Bmatrix} p \\ v \end{Bmatrix}_{\#2} = [T]_{\#2-\#3} \begin{Bmatrix} p \\ v \end{Bmatrix}_{\#3} = [T]_{\#2-U} [T]_{Absorbente} [T]_{D-\#3} \begin{Bmatrix} p \\ v \end{Bmatrix}_{\#3} \quad (8)$$

De donde se puede obtener la matriz de transferencia del tramo con fibra, como sigue

$$[T]_{Absorbente} = ([T]_{\#2-U})^{-1} [T]_{\#2-\#3} ([T]_{D-\#3})^{-1} \quad (9)$$

Las matrices $[T]_{\#2-U}$ y $[T]_{D-\#3}$ responden a la expresión (6), y pueden obtenerse teniendo en cuenta las características del aire [14] y la geometría de los tramos de conducto, todas ellas conocidas. A nivel experimental, diversos autores [16], [17], recomiendan un rango de frecuencias de interés dentro de los límites dados por $0.1\pi < k \cdot s < 0.8\pi$. En el montaje empleado, los micrófonos se encuentran separados una distancia de 0.045 m, para una velocidad del sonido de 340 m/s, supone un rango de frecuencias $378 \text{ Hz} < f < 3022 \text{ Hz}$. Dentro de este rango, puede garantizarse además otra de las condiciones fundamentales y es que el frente de onda debe ser plano. Para el diámetro de conducto empleado (0.0536 m) la frecuencia de corte del primer modo de alto orden [14] es 3715 Hz. Una vez determinada la matriz de transferencia del material absorbente, se pueden obtener la caracterización acústica del material, que viene dada por un número de onda e impedancia equivalente (\tilde{k} e \tilde{Y}) como se expone en el apartado 3. En el caso del número de onda se tiene

$$T_{1,1Absorbente} = \cos(\tilde{k}L) \rightarrow \tilde{k} = \frac{\arccos(T_{1,1Absorbente})}{L} \quad (10)$$

Respecto a la impedancia del conducto, con el fin de independizar su obtención del número de onda, desconocido a priori, se ha procedido de la siguiente manera

$$\frac{T_{1,2Absorbente}}{T_{2,1Absorbente}} = \tilde{Y}^2 \rightarrow \tilde{Y} = \sqrt{\frac{T_{1,2Absorbente}}{T_{2,1Absorbente}}} \quad (11)$$

3. MODELOS DE MATERIALES FONOABSORBENTES FIBROSOS

Existen dos grandes grupos de materiales que tienen la capacidad de absorber energía acústica: de tipo fibroso y de tipo poroso. En ambos casos, la atenuación acústica se debe a los fenómenos de reflexión ocurridos en la fase sólida junto con las pérdidas viscosas en los intersticios [18]. Respecto al comportamiento de la onda acústica, bajo ciertas condiciones, este tipo de medios puede ser modelado como un fluido equivalente [19], caracterizado por un número de onda \tilde{k} e impedancia aparente \tilde{Y} . Para materiales fibrosos es posible emplear, entre otros, el modelo de Delany y Bazley [20].

$$\tilde{k} = k_0 \left(1 + a_3 \left(\frac{f \rho_0}{R_f} \right)^{-a_4} - j a_1 \left(\frac{f \rho_0}{R_f} \right)^{-a_2} \right) \quad (12)$$

$$\tilde{Y} = Y_0 \left(1 + a_5 \left(\frac{f \rho_0}{R_f} \right)^{-a_6} - j a_7 \left(\frac{f \rho_0}{R_f} \right)^{-a_8} \right) \quad (13)$$

donde k_0 , Y_0 y ρ_0 corresponden las propiedades del aire, f es la frecuencia y R_f la resistividad del material absorbente, definida como la diferencia de presión a ambos lados de una muestra de material absorbente dividida entre el producto del espesor de la muestra y la velocidad a través de la misma. Garai [21] obtiene experimentalmente los coeficientes a_i de las ecuaciones (12) y (13) para diferentes fibras de poliéster y compara el coeficiente de absorción acústica obtenido experimentalmente con el modelo original de Delany y Bazley [20] y de Dunn-Davern [22]. Beradi [23] obtiene el coeficiente de absorción y la resistividad de diferentes fibras de origen vegetal como es el caso del kenaf o la fibra de coco y de origen animal como la lana de oveja. En dicho estudio, elige los coeficientes de Garai [21] en base a que las fibras naturales ensayadas poseen un diámetro medio y densidad más cercanas a las fibras de poliéster del estudio de Garai. Por esta razón, en este trabajo se van a emplear los mismos coeficientes. Cabe destacar que se ha hecho la comparativa de las diferentes familias de coeficientes encontrados en [21] y no se ha detectado diferencias significativas. La Tabla 1 recoge el valor de los coeficientes que se han empleado en los modelos teóricos mostrados en este trabajo y los correspondientes a la fibra de vidrio Owens Corning [24] empleada en la validación del sistema experimental.

Modelo	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
Garai	0.074	0.660	0.078	0.623	0.159	0.571	0.121	0.53
Owens-Corning	0.08504	0.732	0.09534	0.754	0.16	0.577	0.18897	0.595

Tabla 1. Coeficientes de las ecuaciones (12) y (13) para fibras naturales y sintéticas

4. RESULTADOS

Con el objetivo de validar el montaje experimental, se ha ensayado la fibra de vidrio Advantex de Owens Corning, empleada anteriormente en diversos trabajos de los autores [12], [13], [24]. Además, se han ensayado fibra de coco y fibra de coco-sisal. En la siguiente tabla se recogen los principales parámetros de las fibras ensayadas [21], [23].

Tipo de fibra	Densidad de llenado $\rho_f (kg/m^3)$	Resistividad $R_{25^\circ C} (rayl/m)$
Fibra Owens-Corning	157	11212
Fibra de coco	60	1500
	96	-
Fibra de coco-sisal	96	-

Tabla 2. Fibras ensayadas

Adicionalmente, se ha construido un silenciador disipativo rellenando una cámara de expansión simple con fibra de coco con una densidad de 60 kg/m³ para la que se conoce su resistividad [23] y se ha obtenido su índice de pérdidas por transmisión (TL) tanto experimental como numéricamente. Finalmente, con el fin de comparar la efectividad de las fibras naturales, se ha calculado numéricamente el TL de un silenciador idéntico (igual geometría y densidad de llenado) con la fibra sintética de Owens Corning.

4.2. Validación de los modelos teóricos

La fibra Advantex de Owens Corning tiene un comportamiento acústico conocido. El número de onda y la impedancia teórica pueden calcularse con las ecuaciones (12) y (13) junto con los coeficientes correspondientes de la Tabla 1. La resistividad de la fibra depende de la densidad y de la viscosidad del aire, según las siguientes expresiones [12]

$$R_{25^{\circ}\text{C}} = 1.083 \rho_f^{1.828} \quad (14)$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{25^{\circ}\text{C}}} R_{25^{\circ}\text{C}} \quad (15)$$

Donde ρ_f es la densidad de llenado de la fibra y μ_T es la viscosidad del aire a una temperatura T . La siguiente gráfica muestra los resultados obtenidos para $\rho_f = 157 \text{ kg/m}^3$ y $R_T = 11328 \text{ rayl/m}$.

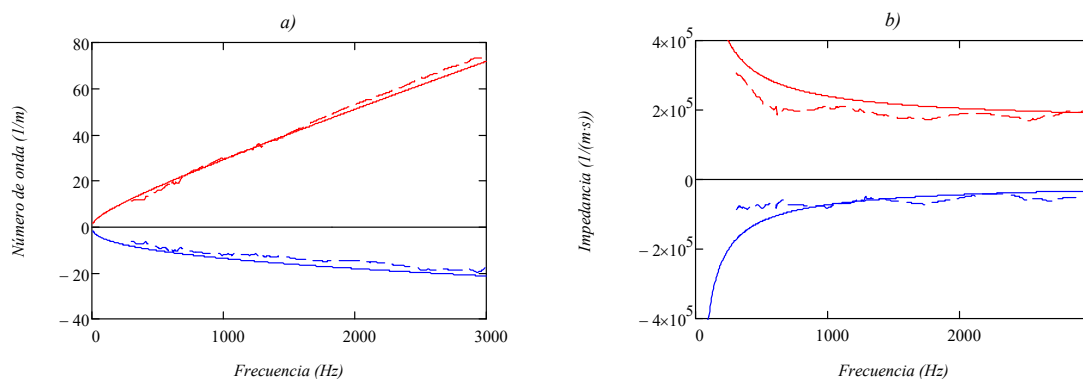


Figura 4. Fibra Owens-Corning. $\rho_f = 157 \text{ kg/m}^3$, $R_T = 11328 \text{ rayl/m}$, a) Número de onda, b) Impedancia. —, Parte real teórica; - - , Parte real experimental; —, Parte imaginaria teórica; - - , Parte imaginaria experimental.

Respecto al número de onda, los resultados obtenidos de forma numérica y experimental presentan una buena correlación en todo el rango de frecuencias estudiado. En el caso de la impedancia, en el rango de media y alta frecuencia, se consiguen de nuevo buenos resultados. Sin embargo, en el rango de baja frecuencia, las medidas experimentales tienden a alejarse de la predicción teórica. En este sentido Kirby y Cummings [25] proponen un modelo semiempírico que suponen una mejora respecto al modelo de Delany y Blazley al proporcionar una predicción más razonable a bajas frecuencias. Teniendo en cuenta la limitación que supone no incluir en este estudio la búsqueda de un modelo teórico más preciso, la técnica experimental adaptada a la obtención de las características acústicas de materiales absorbentes, puede darse por válida.

4.1 Medidas experimentales de fibras naturales

En este apartado se muestran las medidas llevadas a cabo sobre probetas de fibra de coco y coco-sisal. Las primeras han sido empleadas en trabajos previos y se conocen algunas de sus características. En concreto, en la referencia [23] se detalla que para una densidad de compactación de $\rho_f = 60 \text{ kg/m}^3$ posee una resistividad de $R = 1500 \pm 200 \text{ rayl/m}$, de manera que en los cálculos teóricos de este trabajo, se ha tomado el valor medio del rango. Se ha hecho una primera medida con las características conocidas para poder comparar con los modelos (ecuaciones (12) y (13)) publicados en trabajos previos. Los resultados se muestran a continuación.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -
TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

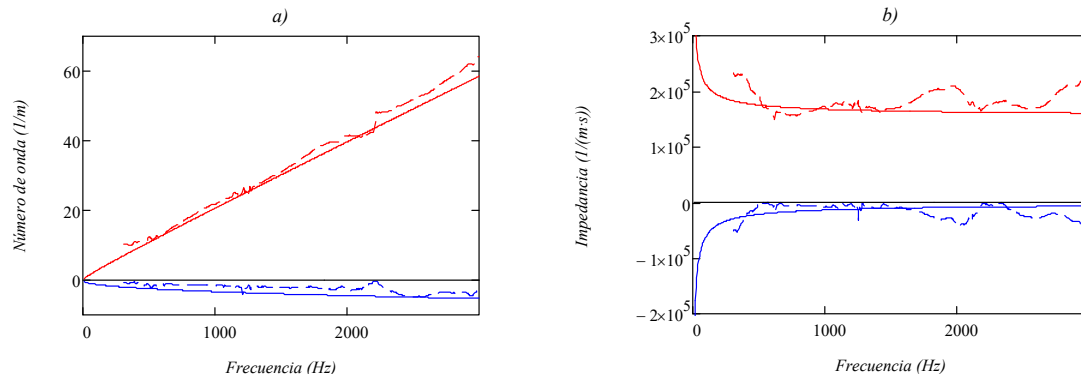


Figura 5. Fibra de coco. $\rho_f = 60 \text{ kg/m}^3$, $R_0 = 1500 \text{ rayl/m}$, a) Número de onda, b) Impedancia.
—, Parte real teórica; - - -, Parte real experimental; —, Parte imaginaria teórica;
- - -, Parte imaginaria experimental.

Las siguientes gráficas corresponden a una densidad de llenado de $\rho_f = 96 \text{ kg/m}^3$ de fibra de coco y de una mezcla de coco y sisal. En este caso no se dispone de predicciones teóricas.

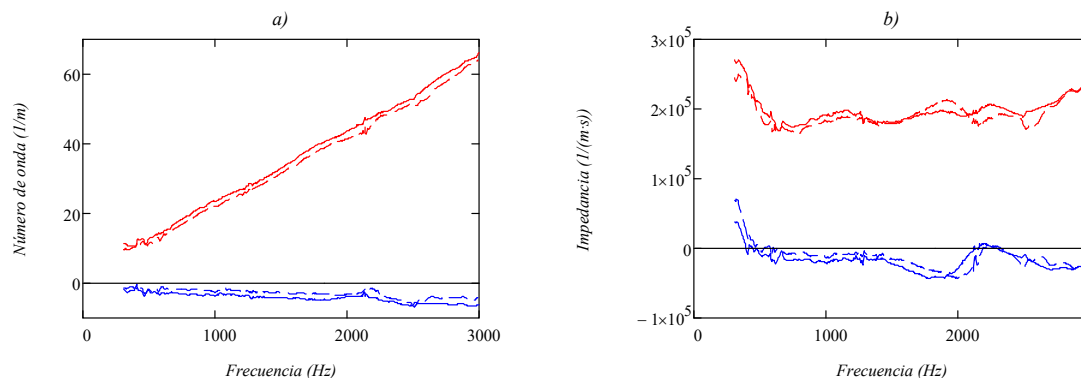


Figura 6. Fibras naturales. $\rho_f = 96 \text{ kg/m}^3$, a) Número de onda, b) Impedancia.
—, Parte real sisal; - - -, Parte real coco; —, Parte imaginaria sisal;
- - -, Parte imaginaria coco.

Se observa por un lado que se repite la tendencia encontrada en las medidas anteriores, lo que deja entrever que la familia de fibras naturales presenta un comportamiento acústico similar, manifestando la fibra de sisal, para una misma densidad de llenado, una capacidad de atenuación ligeramente mayor que la fibra de coco.

4.3 Medida de la atenuación acústica

Con el fin de mostrar en un caso práctico la capacidad atenuante de estas fibras naturales, se ha rellenado una cámara de expansión simple con fibra de coco con densidad $\rho_f = 60 \text{ kg/m}^3$ y se ha obtenido experimentalmente su índice de pérdidas por transmisión (TL). Dicho valor se define, en decibelios, como la relación entre la potencia acústica incidente y la transmitida, con una salida anecoica, es decir, sin reflexiones (en [13] pueden encontrarse más detalles). Además, se ha hecho una simulación numérica para obtener el TL teórico utilizando fibra de Owens Corning con la misma densidad de llenado con el fin de comparar la efectividad de la fibra natural frente a una sintética. También se muestra el TL de esa misma cámara sin fibra. En las siguientes figuras se muestra la geometría y la gráfica con los resultados.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -
TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

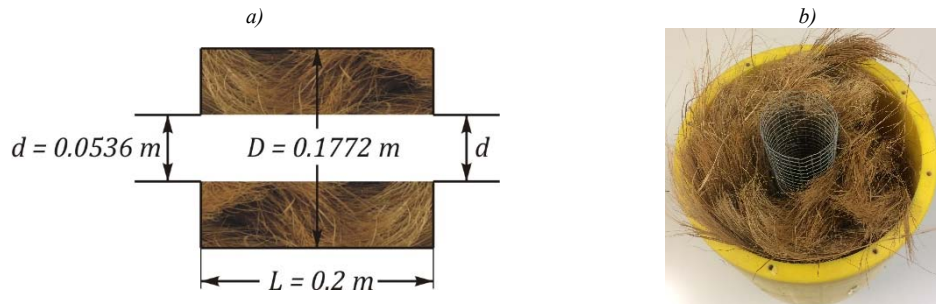


Figura 7. Cámara disipativa con fibra de coco a) dimensiones b) sistema ensayado.

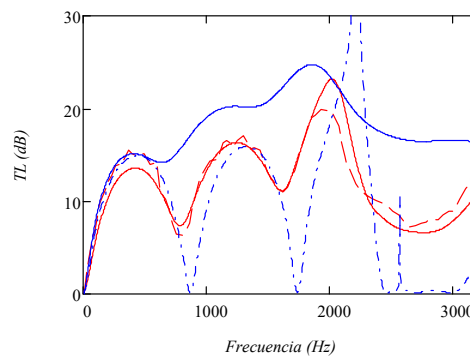


Figura 8. TL de cámara de expansión con fibra $\rho_f = 60 \text{ kg/m}^3$: - - -, Experimental fibra de coco; —, Teórica fibra de coco; —, Teórica fibra Owens-Corning; - · - ·, Teórica cámara sin fibra.

La gráfica muestra por un lado que la previsión numérica tiene una tendencia similar a la obtenida experimentalmente. La diferencia que se encuentra entre ambas puede deberse a la influencia de la distribución no homogénea de la fibra dentro de la cámara inherente a las dificultades de su llenado, como puede intuirse de la Figura 8 b). Como se ha concluido en trabajos previos [12], [26], dicha influencia puede llegar a ser considerable. Por otro lado, puede observarse que, si bien el nivel de atenuación acústica de un silenciador construido con fibra natural (utilizando la misma densidad de llenado) es inferior al conseguido con la fibra sintética de Owens para este caso concreto, existen tendencias similares en lo referente a mitigación de la presencia de bandas de paso propias de la cámara de expansión simple. Por tanto, las fibras naturales son potenciales candidatas para la construcción de dispositivos de atenuación acústica. Cabe indicar que es necesario realizar un estudio más exhaustivo de configuraciones, que será abordado en futuros trabajos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha adaptado la técnica experimental de las dos fuentes con excitación simultánea para la obtención del número de onda y la impedancia aparente de un material absorbente. Los resultados experimentales han sido validados por comparación con los modelos teóricos conocidos de una fibra sintética. Posteriormente se ha obtenido las mismas propiedades experimentalmente para fibra de coco con densidad $\rho_f = 60 \text{ kg/m}^3$ y se ha comparado con modelos teóricos encontrados en la bibliografía, observando una concordancia razonable. Finalmente se ha comparado la atenuación acústica conseguida en un silenciador disipativo con



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica - TECNIAACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

fibra de coco con otro de iguales características con fibra sintética, lo cual ha permitido concluir que las fibras naturales pueden ser potencialmente una alternativa a las sintéticas en determinadas configuraciones geométricas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo recibido del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (proyecto TRA2017-84701-R), así como de la Conselleria d'Educació, Cultura i Esport (Generalitat Valenciana, proyecto Prometeo/2016/007)

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.who.int/>. Fecha de consulta julio 2018.
- [2] M.H.F. De Salis, D.J. Oldham y S. Sharples, "Noise control strategies for naturally ventilated buildings", *Building and Environment*, **37**, 471-484 (2002).
- [3] R. Barron, *Industrial noise control and acoustics*, Marcel Dekker, Nueva York (2003).
- [4] C. Bibby y M. Hodgson, "Field measurement of the acoustical and airflow performance of interior natural-ventilation openings and silencers", *Building and Environment*, **67**, 265-273 (2013).
- [5] Z.H. Wang, C.K. Hui y C.F. Ng, "The acoustic performance of ventilated window with quarter-wave resonators and membrane absorber", *Applied Acoustics*, **78**, 1-6 (2014).
- [6] F.D. Denia, E.M. Sánchez-Orgaz, J. Martínez-Casas y R. Kirby, "Finite element based acoustic analysis of dissipative silencers with high temperature and thermal-induced heterogeneity", *Finite Elements in Analysis and Design*, **101**, 46-57 (2015).
- [7] E.M. Sánchez-Orgaz, F.D. Denia, J. Martínez-Casas y L. Baeza, "Efficient approaches for the acoustic modelling of automotive exhaust devices. Application to configurations incorporating granular materials and monoliths", *ICSV 24*, Londres-Reino Unido (2018).
- [8] E.M. Sánchez-Orgaz, "Advanced numerical techniques for the acoustic modelling of materials and noise control devices in the exhaust system of internal combustion engines", *Tesis doctoral*, Universitat Politècnica de València (2016).
- [9] S. Allam y M. Åbom, "A new type of muffler based on microperforated tubes", *Journal of Vibration and Acoustics*, **133**, 1-8 (2011).
- [10] M.A. Navacerrada, C. Díaz, A. Pedrero, M. Isaza, P. Fernández, C. Álvarez-López y A. Restrepo-Osorio, "Caracterización acústica y térmica de no tejidos basados en fibras naturales", *EuroRegio 2016*, Porto-Portugal (2018).
- [11] J.P. Arenas y M.J. Crocker, "Recent trends in porous sound-absorbing materials", *Sound & Vibration*, **44**, 12-17 (2010).
- [12] A.M. Pedrosa, "Desarrollo de herramientas experimentales para la caracterización acústica de silenciadores en presencia de flujo medio", *Tesis doctoral*, Universitat Politècnica de València (2015).
- [13] A.M. Pedrosa, F.D. Denia, A.J. Besa y F.J. Fuenmayor, "A two source method with simultaneous excitation for the acoustic characterization of exhaust systems with mean flow", *Internoise 2013*, Innsbruck-Austria (2013).
- [14] M.L. Munjal, *Acoustic of ducts and mufflers*, Wiley-Interscience, Nueva York (2014).
- [15] A.F. Seybert y D.F. Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique", *Journal of the Acoustical Society of America*, **61**, 1362-1370 (1977).
- [16] M.L. Munjal, "Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element", *Journal of Sound and Vibration*, **141**, 323-333 (1990).
- [17] H. Bodén y M. Åbom, "Influence of errors on the two-microphone method for measuring acoustic properties in ducts", *Journal of the Acoustical Society of America*, **79**, 541-549 (1995).
- [18] L.L. Beranek, *Noise reduction*, Peninsula Publishing, Los Altos-California (1988).



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -
TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

- [19] J.F. Allard y N. Atalla, *Propagation of sound in porous media*, John Wiley and Sons, Londres (2009).
- [20] M.E. Delany y E. N. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials", *Applied Acoustics*, **3**, 105-116 (1970).
- [21] M. Garai y F. Pompoli, "A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications", *Applied Acoustics*, **66**, 1383-1398 (2005).
- [22] I.P. Dunn y W.A. Davern, "Calculation of acoustic impedance of multi-layer absorbers", *Applied Acoustics*, **19**, 321-334 (1986).
- [23] U. Berardi y G. Iannace "Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications", *Building and Environment*, **94**, 840-852 (2015).
- [24] F.D. Denia, A.G. Antebas, A. Selamet, y A.M. Pedrosa, "Acoustic characteristics of circular dissipative reversing chamber mufflers", *Noise Control Engineering Journal*, **59**, 234-246 (2011).
- [25] R. Kirby y A Cummings, "Prediction of the bulk acoustic properties of fibrous materials at low frequencies", *Applied Acoustics*, **56**, 101-125 (1999).
- [26] E.M. Sánchez, F.D. Denia, J. Martínez, L. Baeza, "3D acoustic modelling of dissipative silencers with nonhomogeneous properties and mean flow", *Advances in Mechanical Engineering*, **2014**, 1-10 (2014).