



FIA 2018

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

DISPOSITIVO ELECTROACÚSTICO PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD AL FLUJO DEL AIRE

PACS: 43.55.Ev

Alba, Jesús¹; Arenas, Jorge Patricio²; del Rey, Romina¹; Rodriguez, Juan Carlos¹

¹Universitat Politècnica de València, Campus de Gandia, C/Paraninfo, 1, 46730 Grao de Gandia, Valencia, España. jesalba@fis.upv.es; roderey@doctor.upv.es, juarodve@gmail.com

²Instituto de Acústica, Universidad Austral de Chile, Casilla 567, Valdivia, Chile, jparenas@uach.cl

Palabras Clave:

Resistividad al flujo, Electroacústica, Caracterización de materiales, Absorbentes acústicos

ABSTRACT

Airflow resistance is a very important parameter in acoustic material characterization. In one hand, there are several theoretical models that are based on this parameter. On the other hand, this parameter allows one to properly select materials for applications in either acoustic insulation or acoustic room condition improvement. However, this parameter is not easy to measure, so some indirect alternative methods have been proposed. This work presents an electroacoustic method to determine this parameter, which is based on the device reported by Dragonetti et al. It is shown that under certain conditions, the value of airflow resistance can be obtained from the electrical impedance of the system.

RESUMEN

La resistividad al flujo del aire es un parámetro que tiene una gran importancia en la caracterización acústica de materiales. Por un lado, existen modelos de comportamiento que se basan en este parámetro. Por otro, permite la selección en el uso de materiales para aplicaciones de mejora del aislamiento acústico o de acondicionamiento acústico. Sin embargo, su medida directa no es sencilla. Por ello aparecen métodos alternativos indirectos. En este trabajo se presenta un procedimiento electroacústico para la determinación de este parámetro que se basa en el dispositivo de Dragonetti et al. En base a medidas de impedancia eléctrica del sistema, se obtiene bajo ciertas condiciones, dicho valor.

INTRODUCCION

La gran mayoría de materiales absorbentes acústicos, independientemente del tipo de material que este elaborado, son de tipo poroso y/o fibroso. Existe un amplio estudio sobre los mecanismos de absorción de energía acústica en el seno de materiales porosos, diferenciando distintos mecanismos en función del tipo de poro que conformen estos materiales [1]. En [2] se referencian muchos de éstos modelos, que desde 1970 hasta la actualidad describen el

FIA 2018

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

comportamiento acústico de un material absorbente a través de la impedancia característica y de la constante de propagación. Para poder desarrollar estos modelos empíricos, una magnitud fundamental es la resistividad al flujo de aire. Este parámetro además, se usa actualmente desde un punto de vista más práctico, en la selección de materiales adecuados para aplicaciones en acondicionamiento y aislamiento acústico.

La resistividad al flujo, junto con el coeficiente de absorción sonora, forma parte de la caracterización para la puesta en el mercado de nuevos materiales basados en fibras recicladas o naturales, como el caso de la lana de oveja [3]. Aparece en numerosas referencias donde se caracterizan nuevos materiales en base a reciclados y a fibras naturales [4][5][6]. También aparece en la caracterización de los materiales que forman los núcleos de las barreras acústicas [7]. La resistividad al flujo no es un parámetro sólo para ingeniería civil y arquitectura. En el ámbito de los textiles técnicos pueden encontrarse métodos específicos para textiles tejidos y no tejidos, de alta resistividad al flujo pero de muy bajo espesor, como el de Jaouen & Becot [8]. También fórmulas para su predicción en textiles finos, en base a modelos de circuitos eléctricos, como en el caso de Pieren [9]. Trabajos recientes como el de Tang et al [10] para predecir el coeficiente de absorción en textiles en base a la resistividad al flujo del aire, demuestra que es un tema de mucho interés también para textiles.

La resistividad al flujo de aire es la resistencia experimentada por el aire cuando pasa a través de un material por unidad de espesor. Se puede obtener en laboratorio de forma normalizada según ISO 9053:1991 [11], o bien utilizando distintos procedimientos descritos por distintos autores [12][13][14][15]. Garai & Pompoli [16] realizaron un trabajo de intercomparación de la ISO 9053:1991 con diez laboratorios distintos, donde además, se usa en algún caso lo que se denomina un "método acústico" no normalizado basado en el trabajo de Stinson & Daigle [12]. En [16] se concluye que debe mejorarse la reproducibilidad entre laboratorios, por lo que se proponen correcciones a la norma. Además, se concluye que el método acústico da resultados similares a la norma con una repetitividad razonable. En este trabajo ya puede verse que las técnicas alternativas acústicas son una opción a la medida de este parámetro, ya que el procedimiento normalizado según ISO 9053:1991 presenta un equipamiento más bien complejo, y es necesario trabajar a muy baja frecuencia. También en [2] se puede encontrar una comparativa entre la ISO 9053:1991 [11] y medidas acústicas con los montajes de Ingard&Dear [5] y Dragonetti et al [15].

En el caso concreto del dispositivo de medida de Dragonetti et al [15] poder conocer el valor de la resistividad al flujo es bastante sencillo y no presenta la limitación de muy baja frecuencia como en la ISO 9053:1991. Aún así, presenta ciertas dificultades en función de la tipología de muestra. En este trabajo se presenta un procedimiento electroacústico para la determinación de la resistividad al flujo que se basa en el dispositivo de Dragonetti et al. En base a medidas de impedancia eléctrica total del sistema (en bornes de entrada del altavoz), se propone un sistema indirecto para su determinación.

MÉTODO ACÚSTICO

El método acústico se basa en un dispositivo de medida en base a Dragonetti et al [16]. En [2] se construyó uno con polimetilmetacrilato de 20 mm de espesor que se puede ver en la figura 1 (esquema y fotografía). El volumen de la cavidad inferior es de 0.99 litros y el de la cavidad superior de 2.30 litros. La parte superior del dispositivo está compuesta por una rejilla perforada donde se apoya la muestra a estudiar. Los detalles de perforación de la superficie, características de micrófonos, altavoz, etc. se detallan en [2]. En [15] se describe de forma detallada una analogía entre el prototipo diseñado y un circuito, con un amplio desarrollo matemático que describe el comportamiento de la presión sonora en ambas cavidades del dispositivo.

MÉTODO ELECTROACÚSTICO

El esquema del montaje de Dragonetti et al. y una imagen del prototipo construido se ha mostrado en la figura 1. Para el método electroacústico se aborda el montaje como un recinto electroacústico. Se ha construido un prototipo idéntico al de la figura 1, eliminando los agujeros para los micrófonos y únicamente dejando las conexiones para el altavoz interno. De esta forma,

FIA 2018

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

el sistema se convierte en un recinto acústico, con un volumen trasero V_{down} , que configura una caja cerrada (una cámara trasera sellada), al que se le acopla un resonador de Helmholtz, constituido por un volumen V_{up} , y una abertura, respiradero o puerto, que es la zona de colocación de las muestras. Es lo que se conoce como paso banda de cuarto orden, que se puede encontrar en trabajos como el de Geddes [17], Berkhoff [18] o Matusiak & Dobrucki [19].

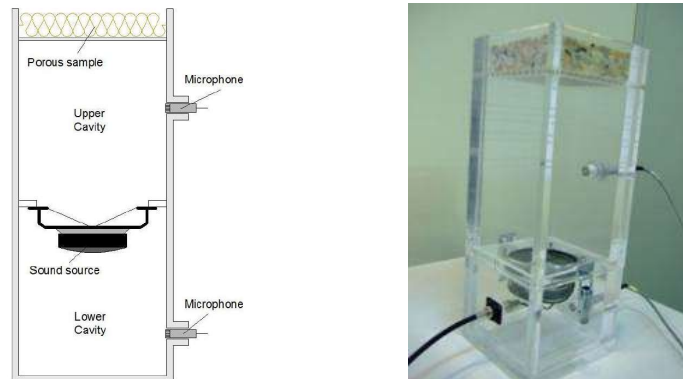


Figura 1. Montaje original del artículo de Dragonetti et al [16]

Se han realizado medidas previas de impedancia eléctrica total, Z_{ET} , del montaje. En la figura 2 se muestra la curva de impedancia eléctrica total medida en el prototipo. Por tanto, el sistema presenta un comportamiento paso-banda de 4º orden, similar al de las referencias [17][18][19], con unas curvas similares. Analizando la figura 2, puede verse el primer máximo asociado a la resonancia del volumen trasero (junto con la anulación de la parte imaginaria), y el segundo pico debido a la resonancia de la puerta. El primer máximo se produce a 175 Hz, el segundo a 306 Hz, y un mínimo a 274 Hz.

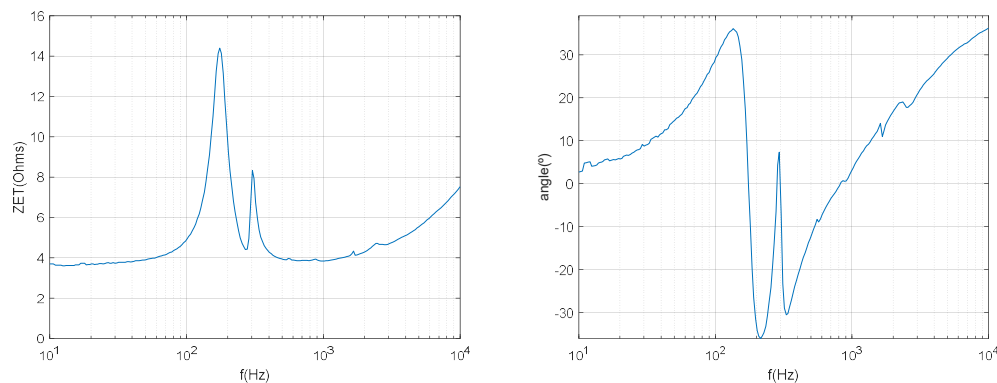


Figura 2. Curva de impedancia eléctrica total del prototipo de Dragonetti et al.

Circuito equivalente electroacústico

Tal y como se ha visto, el montaje de Dragonetti et al. se comporta como un sistema paso banda de 4º orden. En [19] puede verse un análisis con detalle, que presenta el esquema simplificado de la figura 3. En También puede verse en [18] detalles de los circuitos equivalentes genéricos, que permiten modelar un paso banda de 4º orden. En la figura 3 se ve el circuito equivalente acústico, donde el tubo o el puerto de salida se simplifica con una única Masa acústica M_{A2} (no tiene en cuenta elementos resistivos). C_{AT} agrupa las compliancias del altavoz y del volumen trasero (o inferior, C_{down}) del sistema. R_{ATC} agrupa todos los elementos resistivos del sistema formado por caja y altavoz. También Dragonetti et al propone el circuito acústico equivalente de su parte superior cuando se añade la muestra a medir (figura 4). En la figura 4 puede verse que C_{up} se corresponde con C_{A2} y se ha substituido la masa acústica de la puerta, M_{AP2} por una impedancia acústica específica Z_a , que representa la impedancia al flujo del material. A

FIA 2018

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

continuación, se muestra un ejemplo de medida con una carga de material, lana de coco de 19 mm de espesor, y sin carga de material (figura 5).

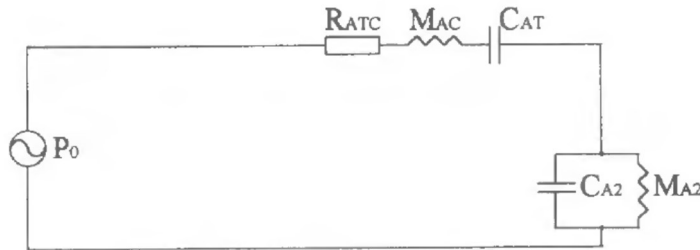


Figura 3. Esquema original del trabajo de Matusiak & Dobrucki [18] desde de la parte acústica

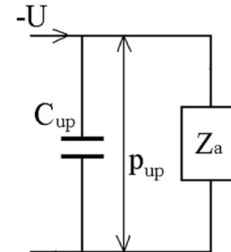


Figura 4. Circuito acústico. Parte superior del prototipo [15]

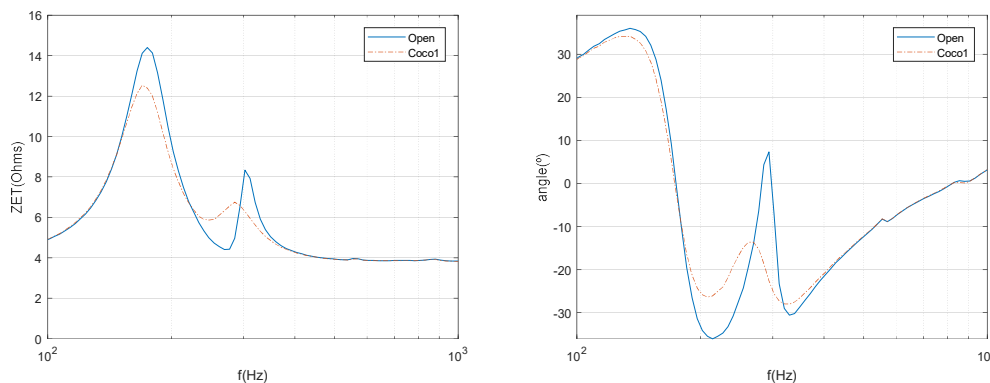


Figura 5. Curva de impedancia eléctrica total sin carga y cargado con lana de coco de 19 mm

La impedancia eléctrica total del montaje, Z_{ET} , puede obtenerse con [17][18][19]:

$$Z_{ET} = Z_E + Z_{MOV} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_{AT} \cdot S_D^2} \quad (1)$$

$$Z_E = R_E + j\omega L_E \quad (2)$$

siendo Z_E la impedancia eléctrica pura del altavoz, dada por la bobina móvil y formada por la inductancia de la bobina móvil medida con el diafragma parado L_E y la resistencia eléctrica de dicha bobina R_E , S_D la superficie del portamuestras, Bl el factor de fuerza del altavoz, y Z_{AT} la impedancia acústica total del sistema. Esta impedancia acústica total se puede obtener de la siguiente forma:

$$Z_{AT} = R_{AC} + j\omega M_{AC} - j \frac{1}{\omega C_{AT}} + Z_2 \quad (3)$$

Donde la nomenclatura seguida es la de [19]. El término Z_2 agruparía el efecto de la compliancia del volumen superior V_{up} (Ca_2) y de la impedancia acústica específica de carga, Z_a . En el caso abierto o "sin material":

$$Z_2 = \frac{Z_{AR}}{1 + j\omega C_{up} Z_{AR}}$$

$$Z_{AR} = c \left[\left(\frac{k_0 a}{2} \right)^2 + j0,6 k_0 a \right] = R_{AR} + j\omega M_{AR}$$

Siendo Z_{AR} la impedancia acústica de radiación a baja frecuencia ($k_0 \cdot a < 0,5$) [15]. En el caso de carga con material la expresión, bajo las hipótesis de Dragonetti et al., donde se desprecia la impedancia de radiación, Z_2 quedaría:

FIA 2018

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

$$Z_2 = \frac{Z_a/S_D}{1 + j\omega C_{up} Z_a/S_D}$$

En el caso de baja frecuencia, se supone la impedancia específica del material:

$$Z_a = R_a + j\omega d(M_a + M_k) = \sigma d + j\omega d(M_a + M_k)$$

$$M_a = \frac{\rho_0 \alpha_\infty}{\phi}, M_k = M_a \frac{\sigma_k}{\sigma_E}, \sigma_k = \frac{2\alpha_\infty \eta}{L_v^2}, \sigma_E = \sigma \phi$$

Donde R_a es la resistencia acústica específica, M_a la masa acústica específica, M_k la masa acústica adicional que depende del cociente de la resistividad al flujo característica σ_k y de la resistividad al flujo efectiva, σ_E , σ es la resistividad al flujo, d el espesor del material, α_∞ la tortuosidad, ρ_0 la densidad del aire, ϕ la porosidad, η la viscosidad dinámica del aire, y L_v la longitud viscosa característica [15]. El término Z_2 se puede expresar de la siguiente forma, en el caso de carga con material:

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

$$R_2 = \frac{R_A}{\omega^4 (C_{up} M_A)^2 + \omega^2 ((C_{up} R_A)^2 - 2C_{up} M_A) + 1}$$

$$X_2 = \frac{-\omega [C_{up} M_A^2 \omega^2 - M_A + C_{up} R_A^2]}{\omega^4 (C_{up} M_A)^2 + \omega^2 ((C_{up} R_A)^2 - 2C_{up} M_A) + 1}$$

Donde $R_A = R_a/S_D$ y $M_A = d(M_a + M_k)/S_D$.

Obtención de la resistividad al flujo y de la reactancia al flujo

El método propuesto para la obtención de la resistividad al flujo se basa en la búsqueda del primer máximo, que se corresponde con parte imaginaria nula. Por tanto, si f_1 representa la frecuencia del primer máximo, la impedancia eléctrica total, aplicando (1) y (2) es:

$$Z_{ET}(f = f_1) = R_E + R_{MOV} = R_E + \frac{(Bl)^2}{R_{AT} \cdot S_D^2}$$

$$R_{AT} = R_{AC} + R_2$$

Donde R_2 en el caso del sistema sin muestra, coincide con la resistencia de radiación, R_{AR} . Con muestra, la resistencia de radiación se desprecia, ya que, teniendo en cuenta que la frecuencia del máximo se encuentra a 175,06 Hz, el valor de k_a a esa frecuencia es de 0,18, es decir menor de 0,5. A esa frecuencia $R_{AR} = 2,79 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ y $M_{AR} = 0,03 \text{ kg}/\text{m}^4$, ambos valores despreciables en el caso de carga con material.

Por tanto, el procedimiento propuesto necesita de una calibración previa. Se realiza una medida de la impedancia eléctrica total del dispositivo sin muestra, además de conocer los términos de R_E y Bl . R_E se puede obtener de la propia curva de impedancia cuando tiende a frecuencia cero. Bl depende del propio altavoz, y puede estar dado por el fabricante o medirlo con técnicas alternativas. Una vez medida la impedancia eléctrica total sin muestra, se localiza el máximo y se despeja R_{AT} . R_{AT} se asume como R_{AC} para la calibración del sistema y permite obtener R_2 una vez calibrado. Localizado el máximo se tienen dos condiciones:

$$R_2(f = f_1) = \frac{R_A}{\omega_1^4 (C_{up} M_A)^2 + \omega_1^2 ((C_{up} R_A)^2 - 2C_{up} M_A) + 1} \quad (4)$$

$$\omega_1 M_{AC} - \frac{1}{\omega_1 C_{AT}} - \frac{\omega_1 [C_{up} M_A^2 \omega_1^2 - M_A + C_{up} R_A^2]}{\omega_1^4 (C_{up} M_A)^2 + \omega_1^2 ((C_{up} R_A)^2 - 2C_{up} M_A) + 1} = 0 \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) configuran un sistema de ecuaciones que incorporan variables del dispositivo: la compliancia acústica del volumen superior C_{up} , la masa acústica M_A y la compliancia acústica equivalente del altavoz junto con el volumen trasero, C_{AT} . La solución:

FIA 2018

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

$$R_A = \frac{C_{AT}^2 R_2}{(C_{AT} C_{up} M_{AC})^2 \omega_1^4 + (C_{AT} C_{up} R_2^2 - 2 C_{AT} M_{AC} - 2 C_{up} M_{AC}) C_{AT} C_{up} \omega_1^2 + (C_{AT} + C_{up})^2} \quad (6)$$

$$M_A = \frac{1}{\omega_1^2} \frac{(C_{AT}^2 C_{up} M_{AC}^2) \omega_1^4 + (C_{up} C_{AT} R_2^2 - M_{AC} C_{AT} - 2 C_{up} M_{AC}) C_{AT} \omega_1^2 + C_{AT} C_{up}}{(C_{AT} C_{up} M_{AC})^2 \omega_1^4 + (C_{AT} C_{up} R_2^2 - 2 C_{AT} M_{AC} - 2 C_{up} M_{AC}) C_{AT} C_{up} \omega_1^2 + (C_{AT} + C_{up})^2} \quad (7)$$

Puede verse que es necesario conocer M_{AC} y C_{AT} . Para obtener este dato se propone una medida de calibración del volumen trasero (sin V_{up}) con el volumen V_{down} original y añadiendo posteriormente un volumen adicional V . Sin volumen original aparece una frecuencia de resonancia, f_0 , dada por:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{M_{AC} C_{AT}}}, \quad C_{AT} = \frac{C_{AS} C_{A_{down}}}{C_{AS} + C_{A_{down}}}, \quad C_{A_{down}} = \frac{V_{A_{down}}}{\gamma P_0 S_D}$$

Con C_{AS} la compliancia acústica del altavoz. Y en el caso de carga con volumen V :

$$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{M_{AC} C'_{AT}}}, \quad C'_{AT} = \frac{C_{AS} C'_{A_{down}}}{C_{AS} + C'_{A_{down}}}, \quad C'_{A_{down}} = \frac{V'_{A_{down}}}{\gamma P_0 S_D} = \frac{V + V_{A_{down}}}{\gamma P_0 S_D}$$

Despejando, se obtiene C_{AS} , C_{AT} y M_{AC} :

$$C_{AS} = C_{A_{down}} C'_{A_{down}} \frac{1 - \left(\frac{f_0}{f'_0}\right)^2}{C_{A_{down}} \left(\frac{f_0}{f'_0}\right)^2 - C'_{A_{down}}}$$

Para la obtención de la parte reactiva de los materiales se realiza, por tanto, una calibración del volumen inferior. Al volumen V_{down} de la cavidad inferior (sin montar la superior) de 0,99 l se le añade un volumen de 2,37 l. Se miden las curvas de impedancia eléctrica total inicial y con la carga de volumen. 187,8Hz, 156,11Hz. Los valores obtenidos son: $C_{A_{down}} = 7,05 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5/\text{N}$, $C_{AS} = 5,50 \cdot 10^{-9} \text{ m}^5/\text{N}$, $M_{AC} = 232,6 \text{ kg/m}^4$.

RESULTADOS

Se presenta a continuación una batería de medidas de materiales, algunas de esas muestras ya se han medido y estudiado en otros trabajos. Se han medido velos de poliéster de baja densidad (m100-1, m100-2, m100-3, m150-1, m150-2, m150-3), lanas de poliéster (PET50020 [20], PET50040 y l600-30 [2]) lanas de coco (Coco1 [2], Coco2[2], Coco S3 [21]), muestras de corcho (Ch1 y otras) y espumas recicladas (D180 y otras [22]). En la figura 6, se muestra un resumen de las curvas y localizaciones de máximos en las muestras. El valor de la impedancia eléctrica total máxima en el caso sin muestra es de 14,06 ohms. En la tabla 1 se resumen los resultados.

CONCLUSIONES

En este trabajo se propone un método electroacústico alternativo para determinar la resistividad al flujo de materiales, basado en el prototipo de Dragonetti et al [15]. Se basa en la calibración previa y medida de la curva de impedancia eléctrica total del prototipo cargado con una muestra de material. Se busca la posición frecuencial del máximo y su valor. A partir de ahí, con algún pequeño cálculo, se aplican las ecuaciones (6) y (7) que permiten obtener los valores previos R_A y M_A . Con R_A , la obtención final de la resistividad al flujo del material es inmediata.

Se han realizado medidas con diferentes materiales. Se puede observar que para valores de resistencia al flujo baja, el sistema funciona con bastante resolución. Si se analiza la figura 6, puede verse que a resistencia al flujo baja (R_A baja) el sistema sigue mostrando claramente el segundo pico en frecuencia, asociado al efecto de "puerta" del montaje. Este pico se va atenuando conforme la resistencia al flujo aumenta, hasta que llega un momento que no se llega a distinguir, aunque sigue mostrando el pico principal en el mismo margen de frecuencias. Sin embargo, si se observa la última gráfica con muestras de corcho (CH1) y espuma D180, se ve un cambio notable en la curva. El comportamiento de paso banda de cuarto orden desaparece y se convierte en un sistema cerrado, por ausencia de radiación por la puerta. Es decir, a partir de

FIA 2018

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

una resistencia al flujo alta (que en este montaje está por encima de los 10 kPa·s/m³) no se puede medir con esta técnica, ya que no hay transmisión a través del material. La resistividad al flujo puede ser alta, pero no así la resistencia al flujo equivalente.

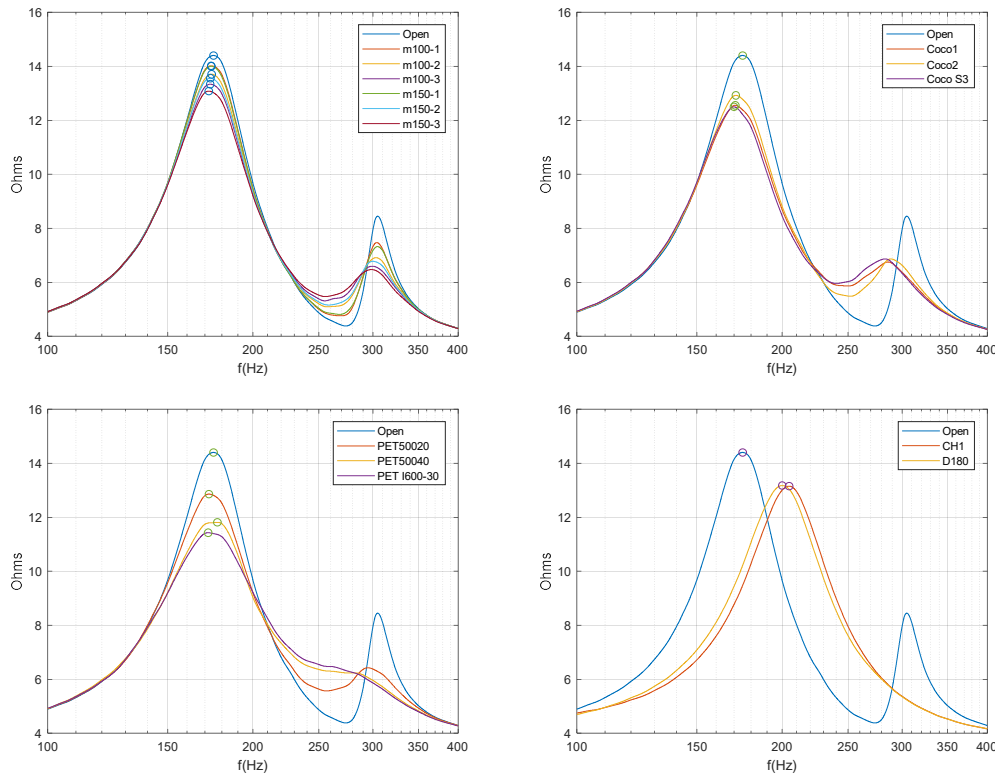


Figura 6. Detalles de localización de máximos en todas las muestras

	M (g)	Density (kg/m ³)	d (m)	Z _{ET} max (Ohms)	f ₁ (Hz)	R _{mov} (Ohms)	R ₂ (Pa·s/m ³)	R _A (Pa·s/m ³)	M _A kg/m ⁴	R _a (Pa·s/m)	Sigma (Pa·s/m ²)
OPEN				14,40	175,06	10,70					
m100-1	1,3	13,0	0,01	14,01	173,65	10,31	3200	1024,5	22,3	10,2	1025
m100-2	2,7	13,5	0,02	13,70	173,91	10,00	5991	1942,3	22,0	19,4	971
m100-3	4,3	14,3	0,03	13,33	173,14	9,63	9506	2930,7	23,0	29,3	977
m150-1	1,7	11,3	0,02	14,00	173,72	10,30	3340	1073,9	22,2	10,7	716
m150-2	3,7	12,3	0,03	13,56	173,16	9,86	7343	2274,7	22,9	22,7	758
m150-3	5,6	12,4	0,05	13,08	172,28	9,38	12117	3539,5	24,1	35,4	787
Coco1	27,6	145,3	0,02	12,55	170,77	8,85	17971	4767,0	26,0	47,7	2509
Coco2	30,8	154,0	0,02	12,92	171,09	9,22	13783	3759,6	25,4	37,6	1880
Coco S3	31,9	145,0	0,02	12,50	170,00	8,80	18613	4737,1	26,8	47,4	2153
PET50020	5,0	26,3	0,02	12,86	172,35	9,16	14497	4226,4	24,2	42,3	2224
PET50040	9,9	26,0	0,04	11,81	172,13	8,11	27482	7543,3	25,7	75,4	1985
1600-30	8,3	25,0	0,03	11,42	171,91	7,72	33148	8739,8	26,7	87,4	2648

Tabla 1. Resumen de resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Study on the design and use of acoustical eco-materials for noise control in buildings” financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico de Chile (Fondecyt 1171110) y por la Universitat Politècnica de Valencia en su prograda de AYUDAS PARA ESTANCIAS DE PERSONAL DOCENTE E INVESTIGADOR EN

FIA 2018

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

CENTROS DE INVESTIGACION DE PRESTIGIO, del Vicerrectorado de investigación, innovación y transferencia, PAID0017.

REFERENCIAS

- [1] Arenas J.P., Crocker M.J., Recent trends in porous sound absorbing materials for noise control, *Sound and Vibration*, 44, 7, 12–17.(2010)
- [2] Del Rey R., Alba J., Arenas J.P., Ramis J. Evaluation of Two Alternative Procedures for Measuring Airflow Resistance of Sound Absorbing Materials. *Archives of Acoustics*, 38(4), 547-554 (2013).
- [3] del Rey, R.; Uris, A.; Alba, J.; Candelas, P. Characterization of Sheep Wool as a Sustainable Material for Acoustic Applications. *Materials*, 10, 1277. (2017)
- [4] Maderuelo-Sanz R, Nadal-Gisbert A V, Crespo-Amorós J E, Parres-García F. A novel sound absorber with recycled fibers coming from end of life tires (ELTs), *Applied Acoustics*, 73, 4, 402-408. (2012).
- [5] Bulent E, Aykut K, Haluk K. Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers. *Archives of Acoustics*, 37,4, 515-520. (2013).
- [6] Garai M., Pompoli F.A. Simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, *Applied Acoustics*, 66, 12, 1383–1398. (2005)
- [7] Del Rey R, Bertó L., Alba J, Arenas J.P. Acoustic characterization of recycled textile materials used as core elements in noise barrier. *Noise Control Engr. J.*, 63(5),439-447. (2015)
- [8] Jaouena L., Becot F. X. Acoustical characterization of perforated facings. *J. Acoust. Soc. Am.* 129 (3), (2011)
- [9] Pieren R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity. *Textile Research Journal*. 82(9) 864–874. (2012)
- [10] Tang X., Jeong Ch., Yan X. Prediction of sound absorption based on specific airflow resistance and air permeability of textiles. *The Journal of the Acoustical Society of America* 144, EL100 (2018)
- [11] ISO 9053:1991. *Acoustics. Materials for acoustical applications. Determination of airflow resistance.*(1991)
- [12] Stinson R., Daigle A., *Electronic system for the measurement of flow resistance*, *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 2422–2428. (1983)
- [13] Ingard K. U., Dear T. A. *Measurement of acoustic flow resistance*. *Journal Sound and Vibration*.103, 4, 567-572. (1985)
- [14] Ren M., Jacobsen F., *A method of Measuring the Dynamic Flow Resistance and Reactance of porous Materials*. *Applied Acoustics* 39, 265-276.(1983)
- [15] Dragonetti R., Ianniello C., Romano A.R.. *Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 129,2,753-764. (2010)
- [16] Garai M., Pompoli F.. A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements. *Acta Acustica united with Acustica*. 89. 471-478. (2003)
- [17] Geddes R.. Introduction to band-pass loudspeaker systems. 37. *J. Audio Eng. Society* 308-342. (1989)]
- [18] Berkhoff, A. P. (1994). Impedance analysis of subwoofer systems. *Journal of the Audio Engineering Society*, 42(1), 4-14. (1994)
- [19] Matusiak G. P., Dobrucki A., Fourth-Order Symmetrical Band-Pass Loudspeaker Systems *JAES Volume 50 Issue 1/2 pp. 4-18; (2002)*
- [20] del Rey R, Alba J, Ramis J, Sanchis V. New absorbent acoustics materials from plastic bottle remnants. *Materiales de Construcción*, 61,204, 547-558. (2011).
- [21] Ramis J, del Rey R, Alba J, Godinho L., Carbajo J. A model for acoustic absorbent materials derived from conocut fiber. *Materiales de Construcción*, 64,313. (2014).
- [22] del Rey R., Alba J., Arenas J.P., Sanchis V.J., An empirical modelling of porous sound absorbing materials made of recycled foam, *Appl. Acoustics*, 73, 604–609, (2012).