

# COMPARATIVA DE MÉTODOS INDIRECTOS PARA LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD DEL FLUJO DEL AIRE EN TEXTILES

Jesús Alba<sup>1</sup>, Romina del Rey<sup>1</sup>, Juan C. Rodríguez<sup>1</sup>, Jorge P. Arenas<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Institute of Acoustics, Univ. Austral of Chile  
{e-mail: jprenas@uach.cl}

## Resumen

La resistividad al flujo del aire es un parámetro que tiene una gran importancia en la caracterización acústica de materiales. La norma ISO 9053:2018 permite su medida directa. Sin embargo, la medida de materiales muy ligeros o con un espesor pequeño, es complicada. Por ello aparecen métodos alternativos indirectos, que la norma también reconoce. En este trabajo se presentan las medidas de la resistividad al flujo de textiles de pequeño espesor, con dos procedimientos en tubo de impedancia. El primero se basa en el método de Ingard & Dear con técnicas acústicas. El segundo es una modificación del primero, basado en una adaptación electroacústica, realizando medidas eléctricas. Se presenta una comparativa de ambos métodos para estos materiales.

**Palabras clave:** resistividad al flujo, métodos indirectos, Ingard & Dear, electroacústica, impedancia eléctrica.

## Abstract

Airflow resistivity is a parameter of great importance in the acoustic characterization of materials. The ISO 9053:2018 standard specifies its direct measurement. However, the measurement of lightweight or low thickness materials is complicated. That is why indirect alternative methods appear, which are also recognized by the norm. In this work, low thickness textile measurements by two alternative methods in an impedance tube are presented. The first one is based on the Ingard & Dear's acoustic method. The second one is a modification of the first, based on an electroacoustic adaptation and electric measurements. A comparison of both methods for these materials is presented.

**Keywords:** airflow resistivity, indirect methods, Ingard & Dear, electroacoustic, electric impedance.

**PACS n°.** 43.55.Ev

## 1 Introducción

La gran mayoría de materiales absorbentes acústicos, independientemente del material del que están elaborados, son materiales porosos. Este tipo de materiales han sido objeto de una gran cantidad de estudios en los que se analizan los mecanismos de absorción de éstos [1]. En [2] se referencian algunos de esos modelos que, desde 1970 hasta la actualidad, han descrito el comportamiento acústico de los materiales absorbentes, mediante la obtención de su impedancia característica y de la constante de

propagación. En el desarrollo de dichos modelos, la resistividad al flujo del aire es una magnitud fundamental.

Actualmente, la resistencia al flujo del aire y el coeficiente de absorción sonora son parte de la caracterización acústica necesaria para poder validar nuevos materiales basados en fibras naturales o recicladas como materiales absorbentes acústicos [3–6]. Este tipo de materiales son ampliamente utilizados en aplicaciones prácticas en ingeniería civil y arquitectura. La resistencia al flujo es también un parámetro importante en el campo de los textiles técnicos. De hecho, existen múltiples métodos aplicados tanto a textiles tejidos como no tejidos de alta resistencia al flujo y muy bajo espesor, como el propuesto por Jaouena & Becot [7]. Fórmulas para su predicción han sido también derivadas de circuitos eléctricos, como las propuestas por Pieren [8]. Algunos trabajos recientes para la determinación de la absorción sonora a partir de la resistividad al flujo, como el propuesto por Tang et al. [9], confirman que éste también es un campo de gran interés en la industria [10, 11].

La resistividad al flujo es la resistencia por unidad de espesor experimentada por el aire al atravesar un material. Puede ser obtenida en un laboratorio siguiendo el método descrito en el estándar ISO 9053:2018 [9], o mediante métodos alternativos, como los propuestos por diferentes autores [12–15]. Algunos estudios [16] han propuesto correcciones al estándar, con el objetivo de mejorar la reproducibilidad entre laboratorios.

Los autores del presente trabajo han llevado a cabo un estudio reciente sobre la media de la resistividad al flujo de aire mediante técnicas electroacústicas [17], basado en el método descrito por Dragonetti et al. [15]. También se ha presentado recientemente un estudio [18] para la determinación de la resistividad al flujo del aire mediante dichas técnicas electroacústicas, pero utilizando un dispositivo como el propuesto por Ingard & Dear [13]. Dichas técnicas electroacústicas se basan en la medida de la impedancia eléctrica total del sistema, medida en los terminales de entrada del altavoz, a partir de la cual se determina la resistividad al flujo del aire.

En este trabajo se presenta una ampliación del trabajo [18], realizando en este caso una validación del método planteado con materiales textiles. Se presenta una comparativa de los resultados obtenidos para la resistividad al flujo del aire de diferentes textiles, utilizando para ello el método original propuesto por Ingard & Dear y su variante electroacústica, propuesta por los autores del presente trabajo.

## 2 Método de Ingard & Dear

En el año 1985, Ingard & Dear presentaron un método acústico para la medida de la resistencia al flujo [13]. En este método, la resistencia al flujo de aire es medida usando un tubo cilíndrico cerrado con una terminación perfectamente rígida, un altavoz que cierra el otro extremo y un par de micrófonos. La Figura 1 muestra el esquema del dispositivo de medida.

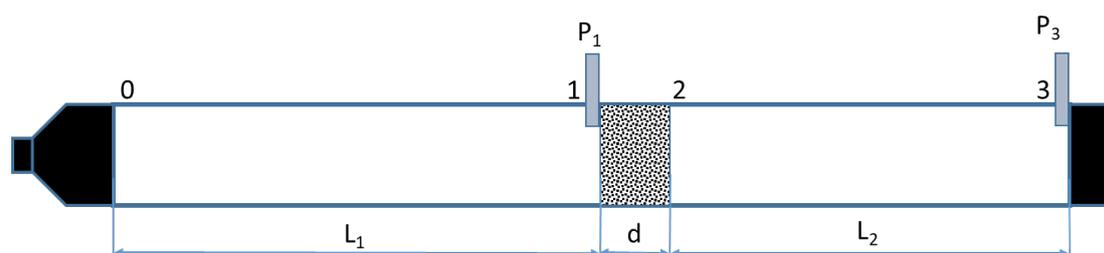


Figura 1 – Esquema del dispositivo propuesto por Ingard & Dear

La muestra de material absorbente, de espesor  $d$ , es insertada en un punto a mitad de este tubo. La distancia entre la cara posterior de la muestra de material y la terminación rígida es  $L_2$ . Uno de los micrófonos es ubicado justo en frente de la muestra de material absorbente ( $P_1$ ), obteniendo así la presión sonora  $p_1$ . El otro micrófono es ubicado frente a la terminación rígida que cierra el tubo ( $P_3$ ) y nos permite obtener  $p_3$ . El altavoz emite un tono puro de baja frecuencia, la cual es elegida con el objetivo de producir un número impar de cuartos de longitud de onda a lo largo de la distancia  $d+L_2$ , desde la terminación rígida a la muestra de material. Este fenómeno se produce a las frecuencias  $fn = (2n - 1)c_0/(4L_2)$ , siendo  $n$  un número natural, y  $c_0$  la velocidad del sonido dentro del tubo. Además, debe satisfacerse la condición  $\lambda \gg 1.7D$ , donde  $D$  es el diámetro interior del tubo y  $\lambda$  es la longitud de onda del sonido.

Asumiendo que las pérdidas en el tubo son despreciables, que los micrófonos están calibrados para tener la misma sensibilidad y que la reactancia al flujo es pequeña en bajas frecuencias, la resistencia al flujo de aire se determina mediante la ecuación (en las frecuencias  $fn = (2n - 1)c_0/(4L_2)$ ):

$$\sigma = \rho_0 c_0 10^{\frac{(p_1 - p_3)}{20}}, \quad (1)$$

donde  $\rho_0$  es la densidad media del aire en el tubo, y  $p_1$  y  $p_3$  son los niveles de presión sonora que corresponden a las presiones medidas  $P_1$  y  $P_3$ , respectivamente.

La ecuación (1) puede obtenerse a partir de funciones de transferencia, asumiendo que las pérdidas son despreciables:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & Z_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(k_0 L_2) & jZ_0 \sin(k_0 L_2) \\ \frac{j \sin(k_0 L_2)}{Z_0} & \cos(k_0 L_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ U_3 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

donde  $k_0$  es el número de onda en el aire,  $U_1$  y  $U_3$  las velocidades volumétricas en los puntos 1 y 3,  $Z_A$  la impedancia acústica del material a ensayo y  $Z_0$  es impedancia acústica del aire de valor  $Z_0 = \frac{\rho_0 c_0}{S}$ , siendo  $S$  la sección transversal del tubo.

Si se aplica la condición de cierre de pared rígida,  $U_3 = 0$ , a la ecuación (2), se obtiene:

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_0 L_2) + \frac{jZ_A \sin(k_0 L_2)}{Z_0} & jZ_0 \sin(k_0 L_2) + Z_A \cos(k_0 L_2) \\ \frac{j \sin(k_0 L_2)}{Z_0} & \cos(k_0 L_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ U_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_0 L_2) + \frac{jZ_A \sin(k_0 L_2)}{Z_0} \\ \frac{j \sin(k_0 L_2)}{Z_0} \end{pmatrix} p_3. \quad (3)$$

A partir de (3), se obtiene la ecuación de Ingard & Dear:

$$\frac{p_1}{p_3} = \cos(k_0 L_2) + \frac{jZ_A \sin(k_0 L_2)}{Z_0},$$

de donde se obtiene  $Z_A$ :

$$Z_A = -jZ_0 \left( \frac{p_1}{p_3} \frac{1}{\sin(k_0 L_2)} - \cot(k_0 L_2) \right). \quad (4)$$

Tal y como se indica en el trabajo de Ingard & Dear, la ecuación (4) se puede simplificar para aquellas frecuencias en las que se anula la cotangente ( $f_n = \frac{(2n-1)c_0}{4L_2}$ , siendo n un número natural). Finalmente,  $Z_A$  vendrá dada por:

$$Z_A = \mp jZ_0 \frac{p_1}{p_3} \quad (5)$$

A partir de (5) se obtiene la resistencia al flujo normalizada,  $\sigma$ :

$$\sigma = \left| \text{Im} \frac{p_1}{p_3} \right| \quad (6)$$

De la ecuación (6) se obtiene la ecuación (1). En [19] puede encontrarse una comparativa de este método con otros dos métodos.

### 3 Método electroacústico propuesto

#### 3.1 Transformación electroacústica

La transformación electroacústica que se propone es similar a la planteada en Alba et al. [17] y ya fue descrita anteriormente en [18]. La impedancia eléctrica total del montaje de la Figura 1,  $Z_{ET}$ , puede obtenerse con la siguiente expresión:

$$Z_{ET} = Z_E + Z_{MOV} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_{AT} S^2} \quad (7)$$

$$Z_E = R_E + j\omega L_E \quad (8)$$

En las ecuaciones 7 y 8,  $Z_E$  es la impedancia eléctrica pura del altavoz, donde  $R_E$  es la resistencia eléctrica de la bobina y  $L_E$  es la inductancia de la bobina móvil,  $S$  la superficie transversal del tubo,  $Bl$  es la constante de acoplamiento electromagnético del altavoz, y  $Z_{AT}$  la impedancia acústica total del sistema. En este caso,  $Z_{AT}$  es la carga sobre el altavoz junto con el efecto de la impedancia mecánica del altavoz,  $Z_M$ :

$$Z_{ET} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_M + Z_{A0} S^2} \quad (9)$$

#### 3.2 Sistema sin muestra

En el caso del tubo vacío, de longitud  $L$  ( $L = L_1 + L_2 + d$ ), la impedancia en  $P_1$  puede servir de referencia. A partir de la ecuación (3), siendo  $Z_A = 0$ ,  $Z_{A1}$  puede obtenerse como:

$$Z_{A1} = \frac{p_1}{U_1} = \frac{\cos(k_0 L)}{\frac{j \sin(k_0 L)}{Z_0}} = -jZ_0 \cotg(k_0 L) \quad (10)$$

La ecuación (10) es la clásica de tubo cerrado sin pérdidas [20]. En este caso,  $Z_{A0}$  coincide con (10) por lo que la impedancia eléctrica total es:

$$Z_{ET} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_M - jZ_0 \cotg(k_0L) S^2} \quad (11)$$

La ecuación (11) se puede utilizar para calibrar el sistema, tanto la impedancia mecánica del altavoz, como la longitud del tubo. Puede comprobarse que en los casos en los que se anula la cotangente del denominador, se cumple que  $f_n = \frac{(2n-1)c_0}{4L}$ , siendo n un número natural.

### 3.3 Sistema con muestra a ensayar

Cuando la muestra a ensayar es introducida en el tubo, según la disposición de la Figura 1, la impedancia eléctrica total viene determinada por:

$$\begin{pmatrix} p_0 \\ U_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(k_0L_1) & jZ_0 \sin(k_0L_1) \\ \frac{j \sin(k_0L_1)}{Z_0} & \cos(k_0L_1) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & Z_A \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(k_0L_2) & jZ_0 \sin(k_0L_2) \\ \frac{j \sin(k_0L_2)}{Z_0} & \cos(k_0L_2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_3 \\ U_3 \end{pmatrix},$$

de donde se obtiene  $Z_{A0}$  como:

$$Z_{A0} = \frac{p_0}{U_0} = -jZ_0 \frac{\cos(k_0(L_1 + L_2)) + \frac{jZ_A}{Z_0} \cos(k_0L_1) \sin(k_0L_2)}{\sin(k_0(L_1 + L_2)) + \frac{jZ_A}{Z_0} \sin(k_0L_1) \sin(k_0L_2)}. \quad (12)$$

A partir de la ecuación (12), se obtienen los casos particulares en los que la cotangente se anula ( $f_n = \frac{(2n-1)c_0}{4L_1}$ , siendo n un número natural):  $\cos(k_0L_1) = 0$  y ( $\sin(k_0L_1) = \pm 1$ ). En esos casos:

$$Z_{A0} = -jZ_0 \frac{\pm \sin(k_0L_2)}{\pm \cos(k_0L_2) \pm \frac{jZ_A}{Z_0} \sin(k_0L_2)} = \frac{Z_0}{j \cotg(k_0L_2) - \frac{Z_A}{Z_0}} \quad (13)$$

Cuando  $L_1 = L_2$ , la ecuación (13) se reduce a:

$$Z_{A0} = -\frac{Z_0^2}{Z_A} \quad (14)$$

Por tanto, en este caso particular,  $Z_{ET}$  puede expresarse como:

$$Z_{ET} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_M - \frac{Z_0^2}{Z_A}} \quad (15)$$

## 4 Resultados experimentales

### 4.1 Calibración

En la Figura 2 se muestra el montaje real, donde  $L_1 = 89.1$  cm y la  $L_2 = 85$  cm. El diámetro del tubo es de 4.2 cm.

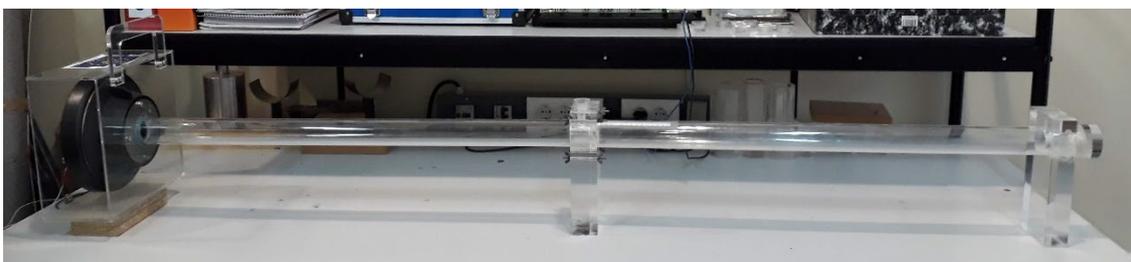


Figura 2 – Montaje experimental del sistema con el tubo completo

Para calibrar el sistema, se realiza una medida cargando el altavoz únicamente con el tubo vacío de longitud  $L_1$  y con un cierre rígido (Figura 3). En la Figura 4 se presentan los resultados de la medida de la parte real e imaginaria de la impedancia eléctrica total, en función de la frecuencia. De forma análoga, en la Figura 5, se presenta la correspondiente impedancia mecánica total del sistema. En estas condiciones, las frecuencias que cumplen  $f_n = \frac{(2n-1)c_0}{4L_1}$ , tomando  $c_0 = 345$  m/s, son: 96.8 Hz, 290.4 Hz, 484.0 Hz, 676.6 Hz, etc. En esas frecuencias, la ecuación (11) se simplifica a:

$$Z_{ET} = Z_E + \frac{(Bl)^2}{Z_M}$$

Conocido el valor de  $Bl = 15$  N/A, dado por el fabricante, se pueden determinar los valores de la impedancia mecánica del altavoz,  $Z_M$  a esas frecuencias, para utilizarlo en la calibración del sistema. En el caso de  $f_n = 96,8$  Hz, se tiene que  $Z_M = 3,99 - 139,19i \Omega_{mec}$ .

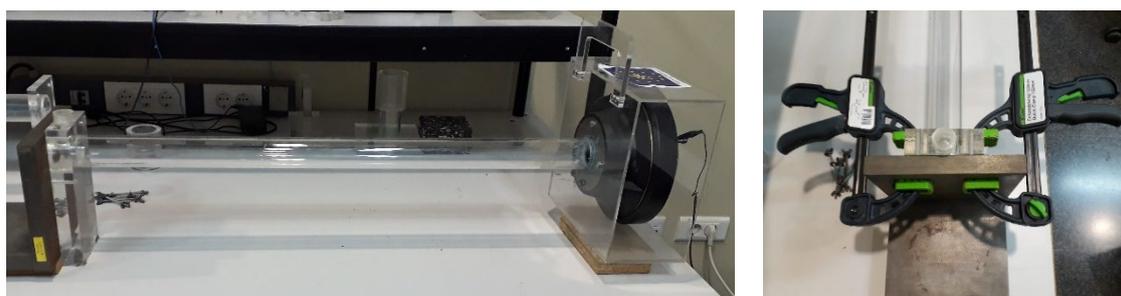
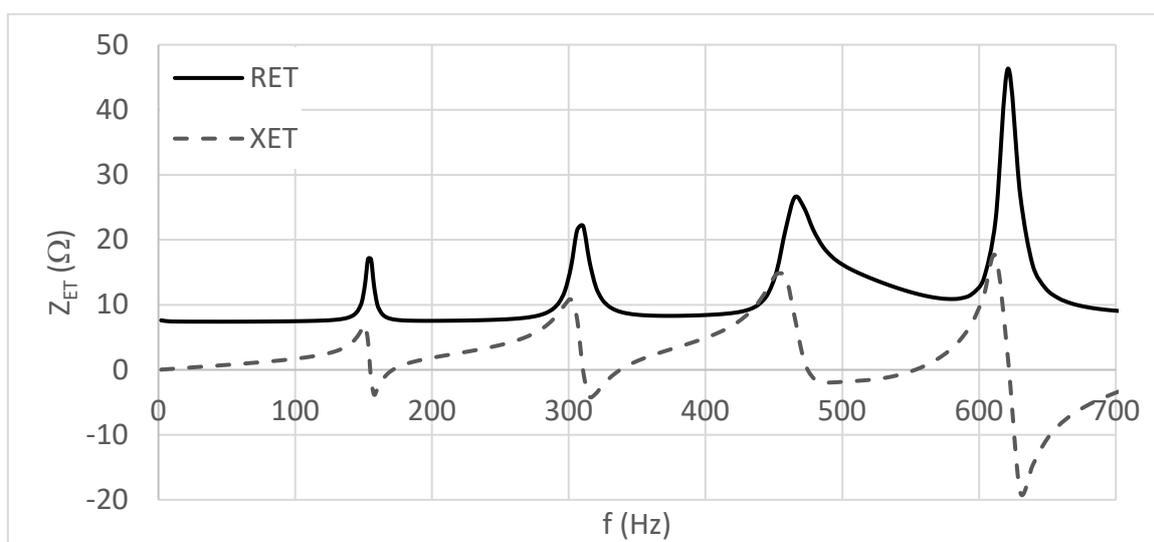
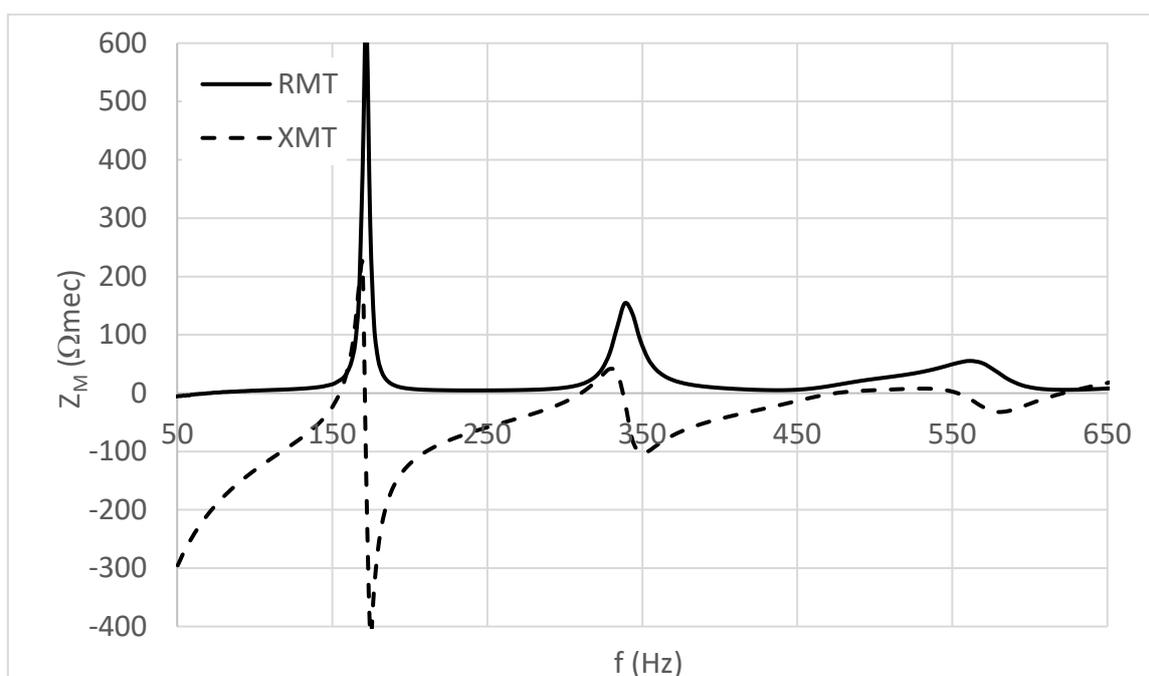


Figura 3 – Montaje experimental con el tubo de longitud  $L_1$  y cierre rígido

Figura 4 – Impedancia eléctrica total ( $Z_{ET}$ ) para el tubo de longitud  $L_1$ Figura 5 – Impedancia mecánica ( $Z_M$ ) para el tubo de longitud  $L_1$ 

#### 4.2 Medición de los diferentes textiles

En el presente estudio, se han realizado mediciones de 5 tipos diferentes de textiles que se muestran en la Figura 6. Se trata de textiles muy finos, con espesores entre los 0.2 mm y 3 mm, cuyas características se detallan en Tabla 1. La caracterización de este tipo de textiles puede llegar a resultar compleja mediante métodos tradicionales y es de gran importancia para la industria, que está mostrando un interés creciente en la utilización de este tipo de materiales para el acondicionamiento acústico.

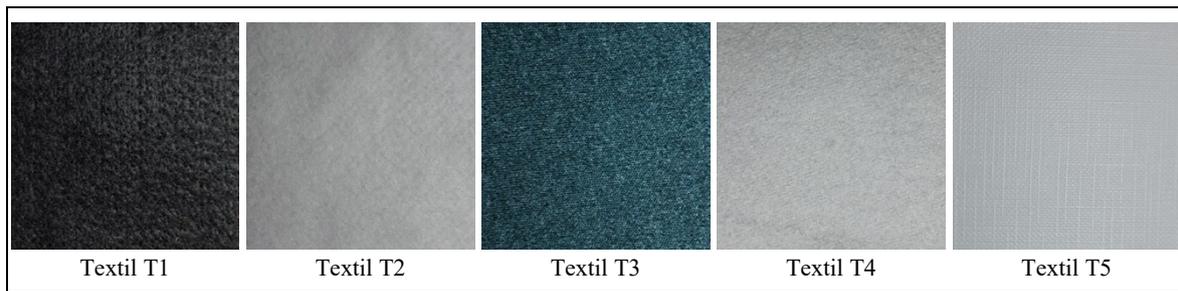


Figura 6 – Textiles sometidos a ensayo

Tabla 1 – Características de los textiles sometidos a ensayo

TEXTIL	Densidad (g/m <sup>2</sup> )	Espesor (mm)
T1	328,1	3,0
T2	521,9	3,0
T3	503,1	1,5
T4	384,4	1,0
T5	350,0	0,2

Para cada uno de los textiles se han empleado 3 muestras diferentes, cuyos resultados se han promediado, y se han realizado los ensayos de resistencia al flujo, tanto por el método de Ingard & Dear (Figura 7) como por el método electroacústico propuesto (Figura 8). Los resultados de ambos ensayos se presentan en la Tabla 2.

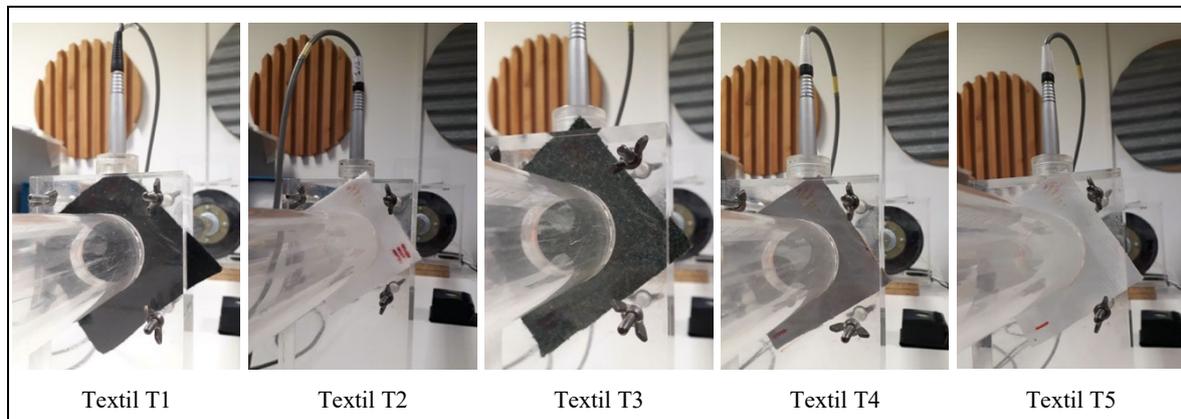


Figura 7 – Detalle de inserción de la muestra en ensayos mediante el método de Ingard & Dear

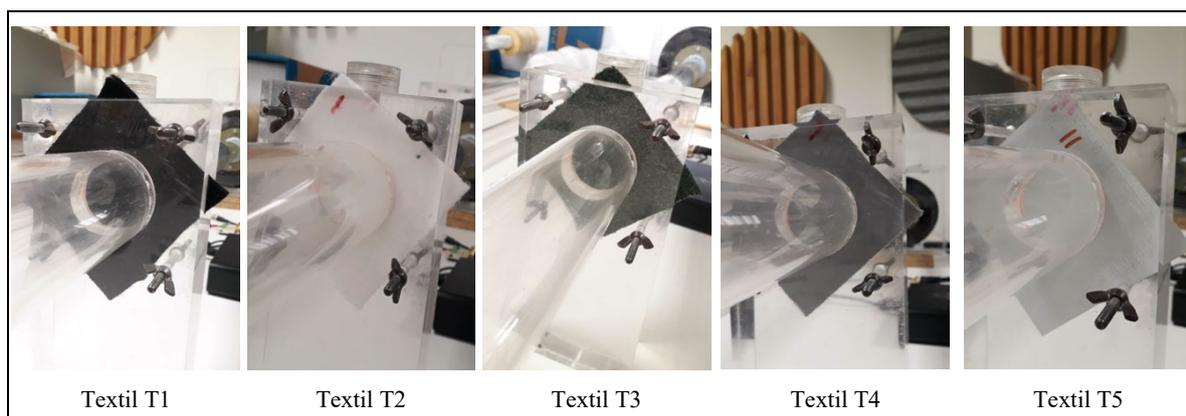


Figura 8 – Detalle de inserción de la muestra en ensayos mediante el método electroacústico

En la Figura 9 se presentan los resultados obtenidos para la impedancia eléctrica total ( $Z_{ET}$ ) de una de las muestras analizadas, concretamente la muestra 1 del textil T1. En la Figura 10 se muestran los resultados de la impedancia mecánica correspondientes al ensayo de esa misma muestra.

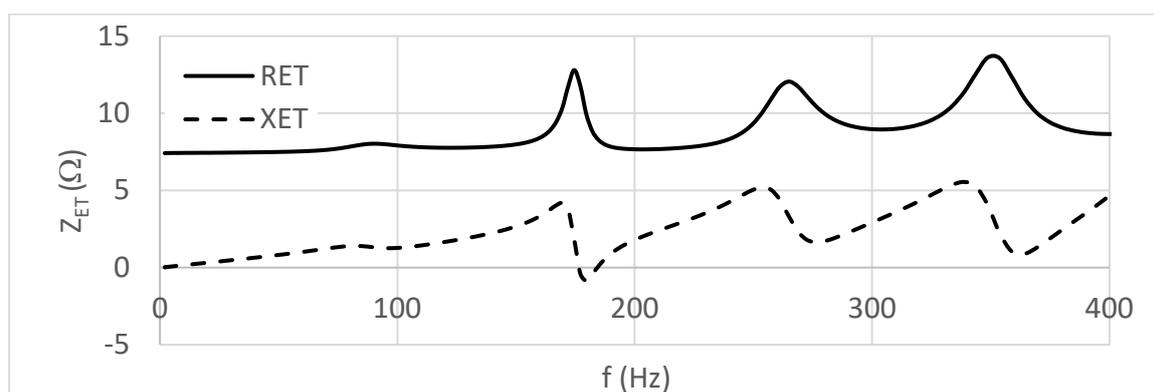


Figura 9 – Impedancia eléctrica total ( $Z_{ET}$ ) de la muestra 1 de T1

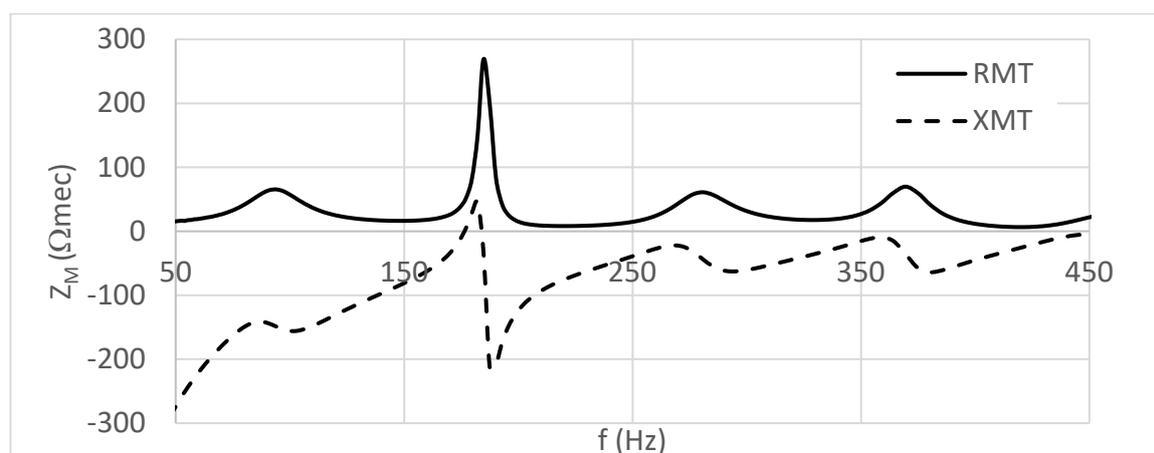


Figura 10 – Impedancia mecánica ( $Z_M$ ) de la muestra 1 de T1

Tabla 2 – Resultados de resistividad específica al flujo

	Método Ingard & Dear			Método electroacústico		
	Resistencia al flujo (Ns/m <sup>3</sup> )	Resistividad al flujo ( $\sigma$ ) (kNs/m <sup>4</sup> )	Error relativo (%)	Resistencia al flujo (Ns/m <sup>3</sup> )	Resistividad al flujo ( $\sigma$ ) (kNs/m <sup>4</sup> )	Error relativo (%)
T1	166,6 ± 13	55,5 ± 4,5	8,1	168 ± 10	56,1 ± 3,4	6,1
T2	285,6 ± 13,1	95,2 ± 4,4	4,6	234 ± 10	77,9 ± 3,5	4,5
T3	131,8 ± 10	87,9 ± 6,4	7,3	136 ± 5	90,43 ± 3,2	3,5
T4	877,3 ± 130	877,3 ± 130,4	14,9	1037 ± 75	1037 ± 75	7,2

Como se puede observar en la Tabla 2, los resultados obtenidos mediante los dos métodos utilizados en general son bastante similares, con ligeras diferencias siempre dentro del orden de magnitud del resultado esperado. Además, se puede comprobar también como el margen de error obtenido en el ensayo de las diferentes muestras de cada material se encuentra por debajo del 10 % para todas las muestras excepto T4 en las medidas de Ingard & Dear, que presenta mayor dispersión. En el caso de la medición electroacústica, el error está por debajo del 7,2 % y siempre por debajo de la medición clásica. Por tanto, a priori parece que el método electroacústico presenta menor error relativo.

En el caso de la tela 4 (T4) se ha podido observar en los ensayos que sus medidas son bastante inestables. Al ser de espesor de 1 mm, una hipótesis es que aparezcan efectos asociados a la manera de colocar la muestra que produzca tensión en el borde circular y, por tanto, genere algún tipo de modo.

En el caso de la muestra de tela 5 (T5) de 0,2 mm la inestabilidad de los ensayos es mayor, hasta el punto que la muestra 1 parece diferente de las muestras 2 y 3. Para muestra 1 de T5 se obtiene un valor de 2700 kNs/m<sup>4</sup> mediante el método clásico de Ingard & Dear y de 2400 kNs/m<sup>4</sup> en la medida electroacústica. Son valores muy altos, pero aun así se detecta por ambos métodos. Las muestras 2 y 3 juntas han dado un valor de 1400 ± 400 kNs/m<sup>4</sup> por el método acústico y 900 ± 50 kNs/m<sup>4</sup> por el método electroacústico. Aquí la hipótesis de que el espesor tan pequeño, junto con la tensión del fijado modifica los resultados se hace más fuerte. Es algo que debe estudiarse para futuros trabajos. Hay que tener en cuenta que cada muestra se monta y se mide por el método acústico y por el electroacústico sin cambiar las condiciones de contorno para poder comparar.

## 5 Conclusiones

En este trabajo se ha verificado la validez de un método de medida de la resistencia al flujo de materiales alternativo, basado en el análisis electroacústico del dispositivo de Ingard & Dear, para la caracterización de materiales textiles.

Mediante el método presentado, a partir de una calibración sencilla y tomando valores concretos de impedancia eléctrica total del sistema con la muestra en su interior, se determina el valor de la resistencia al flujo de los materiales, en este caso de tipo textil.

Los ensayos realizados muestran un grado de ajuste bueno. Puede verse que los datos reflejados en la Tabla 2 muestran coherencia con los resultados obtenidos mediante el método de Ingard & Dear, de contrastada validez.

El método electroacústico ha dado valores de error relativo algo más bajos. Además, el método propuesto es sencillo y no requiere equipamiento complejo, por lo que puede ser una alternativa válida para la determinación de este parámetro.

Queda pendiente un estudio más detallado del efecto con el espesor. A partir de 1 mm hacia abajo, parece que se agudizan efectos de la tensión superficial de la circunferencia de cierre de la muestra, que modifica los datos de la resistividad al flujo.

### Agradecimientos

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

### Referencias

- [1] Arenas, J. P.; Crocker, M. J. Recent Trends in Porous Sound-Absorbing Materials, *Sound & vibration*, vol. 44 (7), 2010, pp. 12–17.
- [2] Allard, J. F.; Atalla, N. *Propagation of Sound in Porous Media. Modelling Sound Absorbing Materials*, 2nd ed. Wiley, 2009.
- [3] 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*, vol. 73 (4), 2012, pp. 402–408.
- [4] Ekici, B.; Kentli, A.; Küçük, H. Improving Sound Absorption Property of Polyurethane Foams by Adding Tea-Leaf Fibers, *Archives of Acoustics*, vol. 37 (4), 2012, pp. 515–520.
- [5] Garai, M.; Pompoli, F. A simple empirical model of polyester fibre materials for acoustical applications, *Applied Acoustics*, vol. 66 (12), 2005, pp. 1383–1398.
- [6] Arenas, J. P.; del Rey, R.; Alba, J.; Oltra, R. Sound-absorption properties of materials made of esparto grass fibers, *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12 (14), 2020, pp. 1–9.
- [7] Jaouen, L.; Bécot, F.-X. Acoustical characterization of perforated facings, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129 (3), 2011, pp. 1400–1406.
- [8] Pieren, R. Sound absorption modeling of thin woven fabrics backed by an air cavity, *Textile Research Journal*, vol. 82 (9), 2012, pp. 864–874.
- [9] Tang, X.; Jeong, C.-H.; Yan, X. Prediction of sound absorption based on specific airflow resistance and air permeability of textiles, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 144 (2), 2018, pp. EL100–EL104.
- [10] Segura-Alcaraz, P.; Segura-Alcaraz, J.; Montava, I.; Bonet-Aracil, M. The effect of the combination of multiple woven fabric and nonwoven on acoustic absorption, *Journal of Industrial Textiles*, 2019, pp. 1–19.
- [11] Atiénzar-Navarro, R.; Bonet-Aracil, M.; Gisbert-Payá, J.; del Rey, R.; Picó, R. Sound absorption of textile fabrics doped with microcapsules, *Applied Acoustics*, vol. 164, 2020, p. 107285.
- [12] Stinson, M. R.; Daigle, G. A. Electronic system for the measurement of flow resistance, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83 (6), 1988, pp. 2422–2428.

- [13] Ingard, K. U.; Dear, T. A. Measurement of acoustic flow resistance, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 103 (4), 1985, pp. 567–572.
- [14] Ren, M.; Jacobsen, F. A method of measuring the dynamic flow resistance and reactance of porous materials, *Applied Acoustics*, vol. 39 (4), 1993, pp. 265–276.
- [15] Dragonetti, R.; Ianniello, C.; Romano, R. A. Measurement of the resistivity of porous materials with an alternating air-flow method, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 129 (2), 2011, pp. 753–764.
- [16] Garai, M.; Pompoli, F. A European Inter-Laboratory Test of Airflow Resistivity Measurements, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 89, 2003, pp. 471–478.
- [17] Alba, J.; Arenas, J. P.; del Rey, R.; Rodríguez, J. C. An electroacoustic method for measuring airflow resistivity of porous sound-absorbing materials, *Applied Acoustics*, vol. 150, 2019, pp. 132–137.
- [18] Alba, J.; Arenas, J. P.; del Rey, R.; Rodríguez, J. C. Electroacoustic method for measuring air-flow resistivity in a standing wave tube. *INTER-NOISE 2019 MADRID - 48th International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering*. 2019.
- [19] Rey, R. del; Alba, J.; Arenas, J. P.; Ramis, J. Evaluation of two alternative procedures for measuring airflow resistance of sound absorbing materials, *Archives of Acoustics*, vol. 38 (4), 2013, pp. 547–554.
- [20] Kinsler, L. E. *Fundamentals of acoustics*. Wiley, 2000.