

INCERTIDUMBRE EN LA MEDIDA DE LA RESISTENCIA AL FLUJO CON EL MÉTODO DE INGARD & DEAR

PACS: 43.55. Ev

Juliá Sanchis, Ernesto¹; Alba Fernández, Jesús²; del Rey Tormos, Romina²; Ramis Soriano, Jaime²

(1) Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras.

Escuela Politécnica Superior de Alcoy, Universidad Politécnica de Valencia.

Plaza Ferrándiz y Carbonell s/n, 03801 Alcoy. Alicante. España.

Tel: 966 528 428. E-mail: erjusan@mes.upv.es

(2) Grupo de Dispositivos y Sistemas Acústicos y Ópticos. DISAO.

Departamento de Física Aplicada; Escuela Politécnica Superior de Gandía.

Universidad Politécnica de Valencia.

Carretera de Nazaret-Oliva s/n, 46730 Grao de Gandía. Valencia. España.

Tel: 962 849 314 – 962 849 300. E-mail: jesalba@fis.upv.es, roderey@doctor.upv.es,

jramis@fis.upv.es

ABSTRACT

The flow resistance is one of the most significant parameters from the point of view of the acoustic characterization of materials. Ingard & Dear proposed a measurement method based on the standing wave tube with two microphones to obtain this parameter from the transfer function. In this work this method has been applied to measure the flow resistance of several types of materials. To evaluate the validity of the method, the uncertainty in the measurements has been analyzed and the obtained results have been studied from the proposed simplification of Ingard & Dear.

This method can be used to characterize any type of material; however in this work only porous and fibrous materials have been tested.

RESUMEN

La resistencia al flujo es uno de los parámetros más significativos desde el punto de vista de la caracterización acústica de los materiales. Ingard & Dear propusieron un método de medida basado en el tubo de ondas estacionarias con dos micrófonos para la obtención de este parámetro a partir de la función de transferencia. En este trabajo se ha aplicado dicho método para medir la resistencia al flujo de varios tipos de materiales. Para evaluar la validez del método se ha analizado la incertidumbre en la medida y se han estudiado los resultados obtenidos a partir de la simplificación propuesta por Ingard & Dear.

Este método puede ser utilizado para caracterizar cualquier tipo de material; sin embargo en este trabajo se han ensayado sólo materiales de tipo poroso y fibroso.

INTRODUCCIÓN

El método basado en el tubo de ondas estacionarias o de Kundt se utiliza para la obtención de parámetros que caracterizan un material desde el punto de vista acústico. En este estudio se han caracterizado varios materiales de tipo poroso y fibroso para medir su resistencia al flujo según el procedimiento descrito por Ingard & Dear [1]. La Figura 1 muestra el esquema del montaje empleado para la medida de este parámetro.

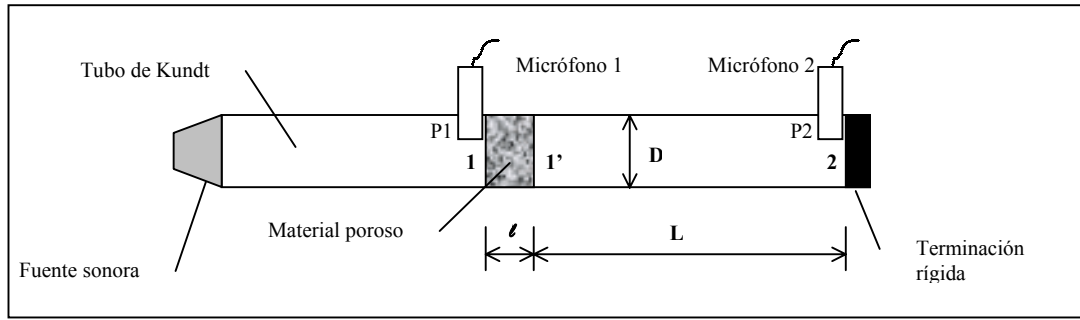


Figura 1. Esquema del montaje de Ingard & Dear para la medida de la resistencia al flujo.

La resistencia al flujo se define como la relación entre la diferencia de presión sonora entre dos puntos y la velocidad. Para medir esta diferencia de presión se utilizan dos micrófonos que se disponen tal como indica la Figura 1. Este método supone que la caída de presión es lo suficientemente pequeña como para considerar que la velocidad es la misma en las caras anterior y posterior de la muestra. También se asume que el espesor de la muestra es mucho menor que la longitud de onda para que la velocidad pueda considerarse constante a través del material.

PROCEDIMIENTO TEÓRICO

Para la aplicación del método, la primera limitación a tener en cuenta es que la longitud de onda debe ser mayor que 1'7 veces el diámetro del tubo. Con esto y a partir de la definición de la longitud de onda, la frecuencia de trabajo debe ser menor a 5000 Hz, pues el diámetro del tubo es de 4 cm:

$$f < \frac{c}{1'7 \cdot D} = \frac{340}{1'7 \cdot 0'04} = 5000 \text{ Hz} \quad (1)$$

La relación entre la velocidad de partícula en 1 y la presión en 2 viene dada por:

$$u_1 = -i \frac{p_2}{\rho_0 c_0} \sin(kL) \quad (2)$$

La relación entre las presiones en 1' (cara posterior de la muestra) y al final del tubo 2:

$$p_1' = p_2 \cos(kL) \quad (3)$$

Y la impedancia al flujo se expresa como:

$$z = \frac{p_1 - p_1'}{u_1} = i\rho_0 c_0 \frac{p_1}{p_2} \frac{1}{\sin(kL)} - i\rho_0 c_0 \cot(kL) \quad (4)$$

Puesto que la función de transferencia se define con la siguiente expresión:

$$H_{12} = \frac{p_2}{p_1} \quad (5)$$

la ecuación (4) puede escribirse como:

$$z = \frac{p_1 - p_1'}{u_1} = i\rho_0 c_0 \frac{1}{H_{12} \sin(kL)} - i\rho_0 c_0 \cot(kL) \quad (6)$$

Según Ingard & Dear, eligiendo $L=(2n-1)\lambda/4$ para $n=1, 2, \dots$ la impedancia al flujo normalizada:

$$\frac{z}{\rho_0 c_0} = \theta + i\chi = i \frac{1}{H_{12}} (-1)^{n-1} \quad (7)$$

De la expresión (7) se desprenden las dos ecuaciones siguientes:

$$\theta = i \left| \text{Imag} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) \right| = \left| \text{Imag} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) \right| \quad (8)$$

$$\chi = \text{Real} \left(\frac{1}{H_{12}} \right) (-1)^{n-1} = \text{Real} \left(\frac{p_1}{p_2} \right) (-1)^{n-1} \quad (9)$$

La parte real θ es la resistencia al flujo y la parte imaginaria χ es la reactancia al flujo. Según se indica en Ingard & Dear, la reactancia al flujo es pequeña a baja frecuencia comparada con la resistencia al flujo, por lo que se puede realizar la siguiente simplificación:

$$\theta \approx \left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \left| \frac{1}{H_{12}} \right| \quad (10)$$

Puesto que lo que se mide son niveles de presión, la simplificación anterior puede expresarse en función de esos niveles como:

$$LP_1 - LP_2 = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \quad (11)$$

Por tanto, midiendo los niveles de presión sonora a las frecuencias de resonancia indicadas, en los puntos P_1 y P_2 , tal y como muestra la Figura 1, el valor de la resistencia al flujo normalizada es:

$$\theta \approx 10^{\frac{LP_1 - LP_2}{20}} \quad (12)$$

Una vez obtenido este parámetro, existen varios modelos para valorar el comportamiento acústico del material [2-8].

MÉTODO EXPERIMENTAL

La Figura 2 muestra dos fotografías tomadas durante la realización de las medidas. La muestra se sitúa en el interior de un tubo de Kundt de metacrilato de 4 cm de diámetro con una fuente sonora en un extremo y terminación rígida en el otro. Para la adquisición de los datos (presiones sonoras en los micrófonos) se ha utilizado la plataforma de medida Symphonie y el posterior tratamiento de la señal se ha realizado con una función matemática diseñada a tal efecto en Matlab.

Para la realización de este trabajo se han seguido las recomendaciones de la Norma UNE-EN ISO 10534-2 [9], que nos permite medir las diferencias de presión utilizando el método de la función de transferencia teniendo en cuenta la corrección de fase correspondiente.



Figura 2. Equipo utilizado para la medida de la resistencia al flujo.

La tabla 1 muestra las características de los siete materiales ensayados.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE LOS SIETE MATERIALES ENSAYADOS

MUESTRA	MASA (g)	ESPESOR(cm)	DENSIDAD(Kg/m ³)
Lana de vidrio	1,30	1,47	70,41
Lana de roca 1	2,80	3,51	63,48
Lana de roca 2	2,80	1,31	170,18
Lana de roca 3	0,5	1,39	28,69
Lana de poliéster I(400)	0,8	1,97	32,30
Lana de poliéster I(700)	0,9	2,59	27,62
Lana de poliéster I(700)-B	1,00	2,63	30,30

La Figura 3 muestra una fotografía de los distintos materiales que se han ensayado.

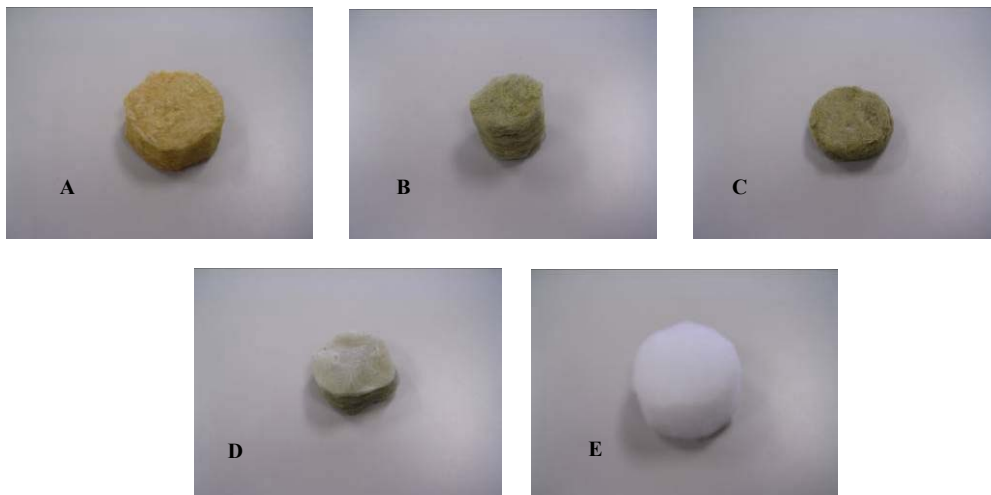


Figura 3. Materiales ensayados. A) Lana de vidrio; B), C) y D) Lanas de roca de diferentes espesores y densidades; E) Lana de poliéster.

RESULTADOS

La Figura 4 muestra, para los siete materiales ensayados, las gráficas que representan el error cometido a las frecuencias de estudio al calcular la parte real de la resistencia al flujo con la simplificación propuesta por Ingard & Dear y sin la simplificación.

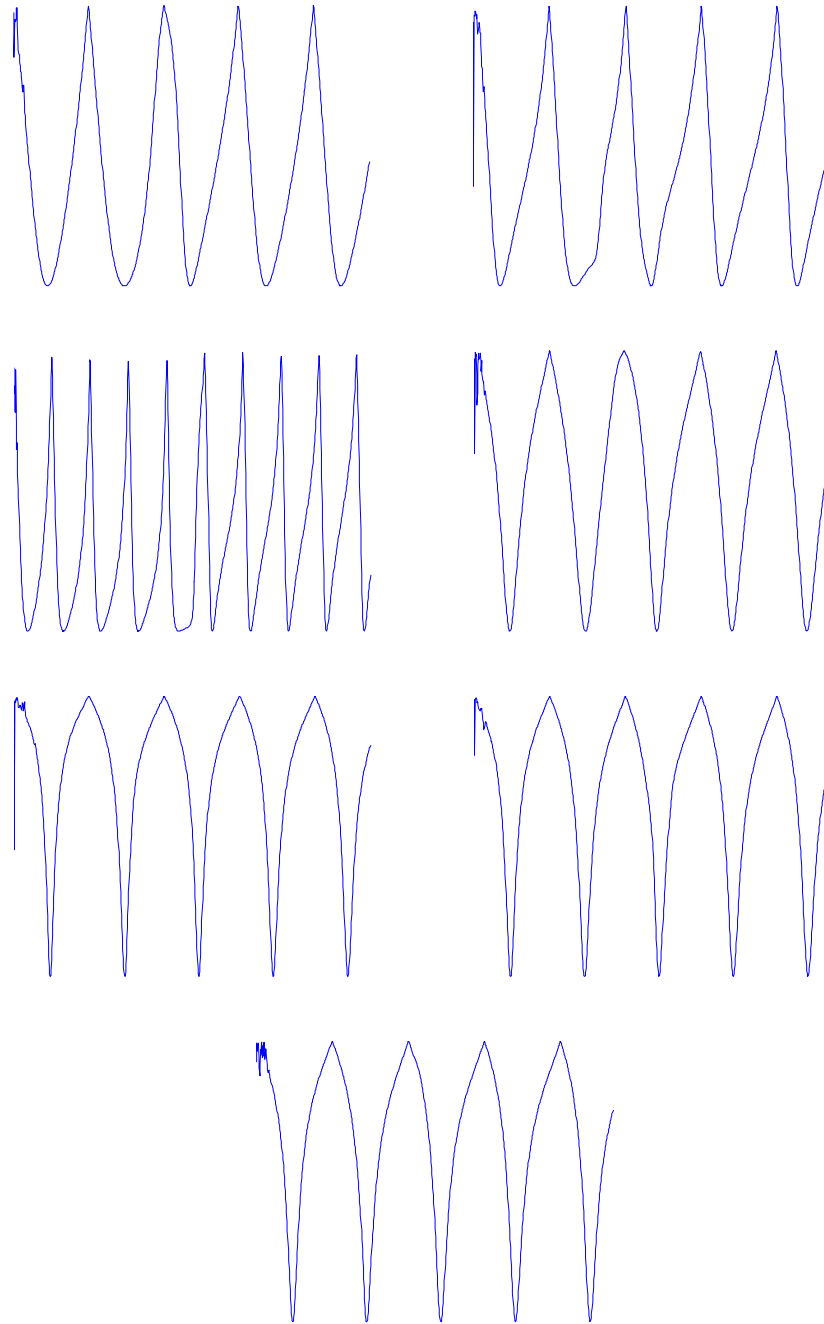


Figura 4. Error cometido a las frecuencias de estudio.

Se observa que el error cometido es despreciable para algunas frecuencias, a las que hemos denominado “frecuencias experimentales” frente a las “frecuencias teóricas” o predichas por Ingard & Dear, que son aquellas que cumplen la ecuación 10.

Por último, la Figura 5 muestra la variación de las partes real o resistiva e imaginaria o reactiva de la impedancia al flujo con la frecuencia. Estas gráficas se han realizado utilizando la simplificación propuesta por Ingard & Dear para las siete muestras ensayadas y también para el caso del tubo sin muestra.

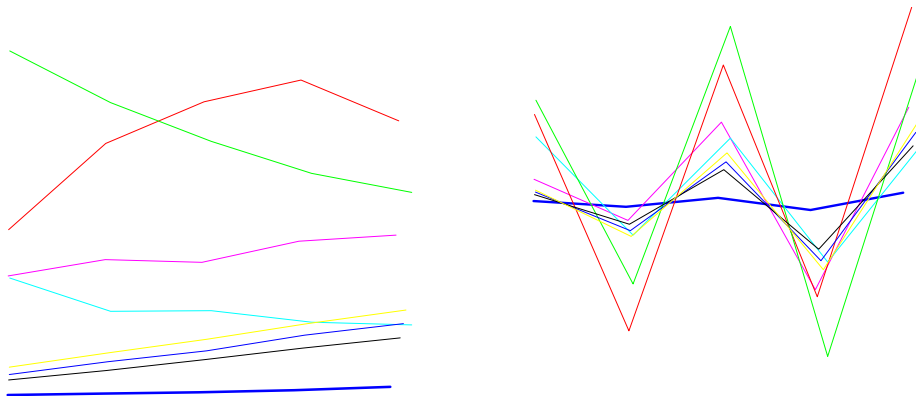


Figura 5. Variación de las partes real e imaginaria de la impedancia al flujo con la frecuencia. Linewidth 4, sin muestra; magenta, lana de vidrio; cyan, lana de roca 1; rojo, lana de roca 2; verde, lana de roca 3; azul, lana de poliéster I(700); negro, lana de poliéster I(400); amarillo, lana de poliéster I(400)-b.

CONCLUSIONES

Respecto al cálculo simplificado propuesto por Ingard & Dear, aunque este es muy aproximado, sería conveniente profundizar en la dependencia frecuencial de algunos parámetros que influyen en los resultados obtenidos con este método. Uno de estos parámetros es el número de onda k . Se han realizado correcciones por la atenuación en el tubo (k compleja) y se ha observado que la parte imaginaria puede considerarse despreciable frente a la parte real, con lo que se concluye que es necesario un desarrollo frecuencial de la velocidad del sonido c .

Otro de los parámetros influyentes en este método es el espesor efectivo de la muestra, cuya dependencia de la frecuencia queda indeterminada por la incertidumbre de la velocidad del sonido. De la observación de las gráficas que muestra la Figura 5, se evidencia que la reactancia del aire es cero, lo cual viene a demostrar la validez del método.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología. D.G. de Investigación (MAT2003-04068).

REFERENCIAS

- [1] Ingard K. U. & Dear T. A., "Measurement of Acoustic Flow Resistance". Journal of Sound and Vibration 103(4), 1985.
- [2] Delany M.E., Bazley E.N., "Acoustical Properties of Fibrous Absorbent Materials". Applied Acoustics 3, (1970), 105-116.
- [3] Miki Y., "Acoustical Properties of Porous Materials – Modifications of Delany&Bazley Models". J. Acoust. Soc. Jpn. (E) 11, 1 (1990) 19-24.
- [4] Allard J.F., Champoux Y., "New Empirical Equations for Sound Propagation in Rigid Frame Fibrous Materials", J. Acoust. Soc. Am. 91 (6), (1992) 3346-3353.
- [5] M. Garai, F. Pompoli, "Definition and First Validation of a New Mathematical Model of Polyester Fibre Materials". Proc. Of Forum Acusticum 2002, Siviglia, 16-20 Settembre 2002.
- [6] I.P. Dunn, W.A. Davern, "Calculation of Acoustic Impedance of Multi-layer Absorbers". Appl. Acoust. 19, 1986, pp. 321-334.
- [7] J. Alba, M^a T. Lorenzana, J. Ramis, "Modelado de Materiales Absorbentes Acústicos a partir de Mediciones en Tubo de Kundt", Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2005.
- [8] Alba Fernández, J., Ramis Soriano, J., Juliá Sanchis, E., Escuder Silla, E., "Empirical Equations for Sound Propagation for Different Absorbents", Thirteenth International Congress on Sound and Vibration, ICSV13, Vienna 2006.

[9] Norma UNE-EN ISO 10534-2: "Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia."