

## **MEDIDA “IN-SITU” DE LA IMPEDANCIA ACÚSTICA DE MATERIALES CON TÉCNICAS INTENSIMÉTRICAS**

REFERENCIA PACS: 43.28.En

Pérez A<sup>1</sup>.; Tejada F<sup>2</sup>.; Machimbarrena M<sup>a</sup> <sup>3</sup>.; Herráez M. <sup>2</sup>; González J. <sup>3</sup>

1 Laboratorio Acústica, L.T.I. Universidad de Valladolid

Paseo del Cauce s/n. Valladolid. España

2 Dpto. IMEIM; E.T.S.I. Industriales. Universidad de Valladolid

Paseo del Cauce s/n. Valladolid. España

3 Dpto. de Física; E.T.S. Arquitectura. Universidad de Valladolid

Avda. Salamanca s/n. Valladolid. España

Tel: 34 983 423 446. Fax: 34 983 423 425

E-mail: juliog@opt.uva.es

### **ABSTRACT**

In order to measure the impedance of small samples under laboratory conditions, the most frequent is to use the impedance tube. On the other hand, when it comes to “in situ” measurements, this technique is no longer valid since it has many disadvantages. Recently a new technique based on two microphone measurements or intensity technique is being developed.

The purpose of our paper is to perform a comparative analysis of the impedance values obtained for one sample material under laboratory conditions according both to the impedance tube and to the intensity method. With this results it is our aim to quantify the error associated to the intensity method.

From the experimental results we have obtained, it can be deduced that the two microphone technique yields highly acceptable results as long as mounting conditions are adequate. It is also important to specify clearly which are the mounting conditions in each case.

### **RESUMEN**

Una de las técnicas más usuales para la medida de pequeñas muestras en el laboratorio es el tubo de impedancias. Sin embargo, esta técnica presente inconvenientes cuando se pretenden realizar medidas “in situ”. En la actualidad se está tratando de adecuar a este propósito una técnica relativamente moderna que se suele denominar como la técnica de los dos micrófonos y también como sonda de intensidad. El objetivo fundamental que nos proponemos al realizar este trabajo es efectuar un estudio comparativo entre los valores obtenidos, realizando medidas de la misma muestra, por los dos métodos y de esta forma tratar de acotar los errores que aparecen en la técnica denominada por intensimetría. De los ensayos realizados se deduce que esta técnica aporta resultados muy aceptables en las condiciones de montaje apropiadas que es necesario especificar en cada caso.

### **INTRODUCCIÓN**

En muchas ocasiones se plantea la necesidad de determinar la respuesta de un material ante la incidencia de una onda acústica. Cuando la energía sonora incide sobre una superficie de separación de dos medios, parte de ella se distribuye entre los dos espacios y parte se transforma en calor. La energía que vuelve al espacio de la onda incidente es la

denominada como energía reflejada y el resto es la energía absorbida. La capacidad de reflexión de los medios depende de las características mecánicas del material, de su composición, de la forma de incidir la onda y de la frecuencia del sonido. Esta capacidad de reflexión de la superficie viene caracterizada por la impedancia acústica  $z$  que se define como el cociente entre la presión acústica en el punto y la velocidad de vibración de la partícula situada en ese punto.

El conocimiento de esta magnitud  $z$  es muy importante para poder predecir como se distribuye la energía sonora en un medio donde haya superficies reflectoras o obstáculos en general como puede ser el suelo o las superficies de los edificios en una ciudad cuando se propagan ruidos procedentes de múltiples fuentes: tráfico rodado, tren, etc.

Existen varios métodos para determinar esta impedancia  $z$  de los materiales que pueden ser agrupados en dos apartados:

- Métodos indirectos
- Métodos directos.

En el primer grupo incluimos los métodos que se basan en deducir el valor a partir de modelos de propagación en los que se incorpora la impedancia mediante expresiones modelizadas en función de la frecuencia del sonido y del parámetro de resistividad al flujo  $\sigma$ .

El segundo grupo abarca las técnicas diseñadas y preparadas para medir directamente esta magnitud  $z$  o alguna otra directamente relacionada con ella.

Actualmente existen varios métodos, aceptados como válidos, para la medida de la impedancia acústica de materiales. El método más utilizado y conocido por su facilidad y rapidez, a la vez que fiable cuando se cumplen las premisas de partida, tal vez sea el que se basa en un cilindro cerrado por un extremo, donde se incorpora la muestra, con una fuente emisora en el otro extremo y que es conocido como el tubo de impedancia y tomando como algoritmo de cálculo el que se conoce como Método de la Función de Transferencia. Dado que el tubo es generalmente de diámetro relativamente reducido, para determinar la impedancia acústica, por este método, es necesario disponer de muestras de pequeñas dimensiones y por tanto el método se limita a materiales homogéneos. También se debe tener en cuenta que este método solo es válido para el caso de determinar  $Z$  en situaciones de incidencia normal.

En la década de los 80 se comenzó a utilizar un nuevo método para la medida de la impedancia acústica de materiales especialmente útil para medidas "in-situ" y se basa en el análisis, en tiempo real, de las señales recogidas por un analizador, procedentes de dos micrófonos dispuestos de forma adecuada en una unidad diseñada para determinar simultáneamente la presión acústica y la velocidad de vibración en una dirección determinada. Conociendo estas magnitudes se puede calcular su cociente y por tanto la impedancia. Mediante esta técnica que se denomina de intensimetría se puede medir la impedancia acústica de cualquier material en una situación real y además para incidencias distintas a la normal lo que supone evitar los condicionantes que impone la técnica del tubo de impedancia.

Si bien esta técnica presenta ventajas importantes, respecto al método tradicional del tubo de impedancia, como hemos señalado anteriormente, tiene también sus limitaciones, en el rango de medida, derivadas principalmente de la propia instrumentación utilizada. Según esto cabe esperar que a medida que se vayan produciendo mejoras tecnológicas, en la cadena de medida, mejoraran los resultados obtenidos con la técnica de los dos micrófonos.

El objetivo fundamental que perseguimos al realizar este trabajo es realizar medidas mediante esta técnica de los dos micrófonos y compararlas con las que se obtienen realizando la medida por el método tradicional del tubo de impedancias. De esta forma podremos valorar la fiabilidad del método con el fin de aplicarlo a situaciones en las que no es posible utilizar el tubo como es el caso, por ejemplo, en que haya que realizar medidas "in situ". Para poder comparar resultados es necesario hacer la medida en unas condiciones válidas para los dos métodos y por ello en este trabajo presentamos los resultados obtenidos en la medida de la

impedancia acústica de distintos materiales, para incidencia normal por la técnica intensimétrica (técnica de los dos micrófonos), y por la técnica del tubo de impedancia (Método de la Función de Transferencia).

### MÉTODO DE MEDIDA POR INTENSIMETRÍA

Básicamente, el método de medida por intensimetría consiste en la estimación de la impedancia acústica en un punto próximo a la muestra, midiendo la presión y la velocidad de la partícula (estimación por gradiente de presión) en el mismo punto. El instrumento utilizado es la sonda de intensidad que esencialmente consta de dos micrófonos iguales enfrentados y dispuestos sobre la misma línea a una distancia, que se puede fijar por el operario dentro de unos márgenes, y que está en función del tipo de medida. En la figura 1 se esquematiza el montaje. El punto donde la sonda mide la presión y la velocidad se encuentra en el espacio comprendido entre los dos micrófonos. Con los valores de presión y velocidad se mide la impedancia en este medio y a partir de este dato, conociendo la impedancia característica del medio ( $\rho c$ ) donde se efectuó la medida, en el supuesto de que la onda sea plana, se puede determinar la impedancia del segundo medio a partir de las relaciones:

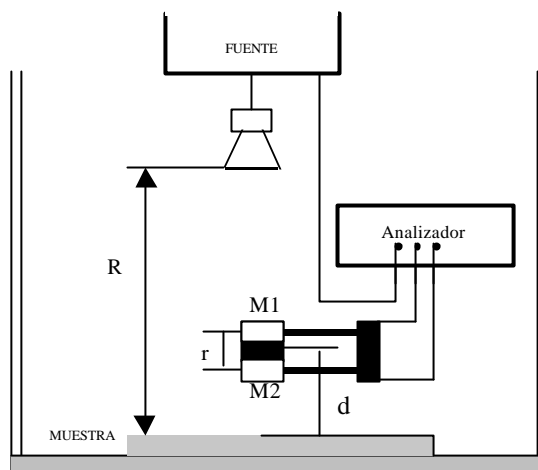


Fig. 1- Cadena de medida para la estimación de la impedancia acústica.

$$p_i = p_{oi} e^{i(\omega t - \omega x/c)} ; p_r = p_{or} e^{i(\omega t + \omega x/c)} ; u_i = p_i / \rho c ; u_r = - p_r / \rho c$$

Donde  $p_i$  y  $p_r$  son respectivamente las presiones acústicas de la onda incidente y reflejada en la superficie que separa los dos medios. De igual forma  $u_i$  y  $u_r$  son sus velocidades respectivas. Teniendo en cuenta la definición de impedancia acústica, su expresión en un punto "x" del medio donde se propagan las ondas incidente y reflejada es:  $z_x = (p_i + p_r)/(u_i + u_r)$

$$z = \frac{Z_0 - i \rho c \tan(\omega d/c)}{\rho c - i Z_0 \tan(\omega d/c)}$$

y por tanto al sustituir para  $x = d$  encontramos la expresión:

Donde  $Z_0$  es la impedancia entre los dos micrófonos, calculada a partir del cociente entre la presión y la velocidad de la partícula, y  $d$  la distancia entre el centro de la sonda y la muestra.

Unas relaciones importantes que nos permiten determinar el valor de otros parámetros a partir de la impedancia son los que existen con el coeficiente de absorción  $\alpha$  del material y el

$$R = \frac{z - 1}{1 + z}; \quad a = 1 - |R|$$

coeficiente de reflexión R de onda plana:

Donde R y z son números complejos.

#### Breve Desarrollo de la Técnica de Intensimetría

Como hemos comentado anteriormente, la técnica de medida por intensimetría presenta ventajas importantes frente a otras técnicas de medida pero también tiene sus limitaciones derivadas tanto de los fundamentos físicos en los que se basa el método como de la propia instrumentación utilizada. Básicamente se puede decir que existen dos fuentes de error sistemático:

- La aproximación de diferencias finitas
- El desfase introducido entre ambos canales por la cadena de medida.

Respecto a la aproximación de diferencias finitas, según demuestra Fahy teóricamente [3], para que el error producido en la estimación del nivel de intensidad sea inferior a  $\pm 1$  dB, es preciso que la longitud de la onda incidente sea, al menos, seis veces mayor que la longitud  $\Delta r$  del espaciador utilizado entre micrófonos o, lo que es lo mismo,  $k\Delta r < 1.2$ . Lo cual se traduce estrictamente en que  $\Delta r > 5.3\lambda$  y de esta forma si se desea que el error, en la estimación del nivel de intensidad no supere  $\pm 0.5$  dB, será preciso exigir  $\Delta r > 7.8\lambda$ . Por tanto de acuerdo a esta limitación ocurrirá que, por ejemplo, con un espaciador de 12 mm, ( $\Delta r = 12$  mm) la frecuencia más alta que se puede medir, sin que el error introducido por la aproximación de diferencias finitas supere  $\pm 1$  dB, es 5 kHz.

Por otra parte, se ha demostrado que la magnitud del error asociado al desfase entre los dos canales depende únicamente del campo sonoro en cuestión, representado por el índice de presión-intensidad  $d_{pI}$  y de las características del equipo de medida de intensidad, representado por el índice de presión-intensidad residual  $d_{pI_0}$ .

Ateniéndose a este parámetro tenemos que si se pretende un error normalizado de  $\pm 0.25$ , o lo que es lo mismo, un error en la estimación de la intensidad de  $\pm 1$  dB, se debe cumplir que:  $d_{pI_0} - d_{pI} \geq 7$ . Y si se deseara una precisión de  $\pm 0.5$  dB, entonces es necesario que la diferencia entre ambos indicadores sea mayor que 10 dB.

Otra forma común de expresar esta limitación es en función de la capacidad dinámica del equipo,  $L_d$ , definida como el índice de presión intensidad residual  $d_{pI_0}$  menos un factor de precisión K, que toma el valor 7 dB para errores entre  $\pm 1$  dB y el valor 10 para errores de  $\pm 0.5$  dB. En este caso, en función del máximo error admisible, se podrán aceptar tan sólo aquellas medidas que cumplan:  $L_d \geq d_{pI}$

En pocas palabras, la aproximación de diferencias finitas impone una limitación a la máxima frecuencia fiable, mientras que el desfase entre canales supone una limitación a bajas frecuencias. De aquí deducimos que lamentablemente, aquellas condiciones que reducen el error debido a la aproximación de diferencias finitas, incrementan el error debido al desfase entre canales, por lo que se debe llegar a una situación de compromiso para la cual las dos fuentes de error quedan acotadas. En consecuencia, cuando se pretende efectuar medidas por esta técnica se hace necesario realizar una discusión previa acerca de los errores que se pueden cometer y de los límites que impone la propia medida. En general a la hora de especificar las limitaciones y errores debemos centrar la atención en los parámetros siguientes:

- Distancia fuente-muestra (aproximación a onda plana)
- Separación entre los dos micrófonos (estimación de la velocidad de la partícula y rango de frecuencias).
- Separación entre la muestra y la sonda de intensidad.
- Impedancia acústica del material
- Tamaño del material

Los ensayos que se realizaron estaban encaminados a cuantificar estos parámetros y establecer la mejor configuración posible.

**INSTRUMENTACIÓN Y MEDIDAS REALIZADAS**

Los ensayos se realizaron en la cámara semianecoica de la ETS de Ingenieros Industriales de la Universidad de Valladolid y por tanto en condiciones ideales de campo libre. Las unidades instrumentales fundamentales que se utilizaron en la realización de las medidas son las siguientes:

Analizador de espectros en tiempo real BK 2148 ;Sonda de intensidad BK 3545; Calibrador de intensidad BK 3541; Fuente sonora BK 4224 ;Tubo de impedancia BK 4206.

Con el fin de intentar valorar la influencia de los parámetros descritos anteriormente se realizaron muestreos de varios materiales (lanas de roca de distintas densidades, una espuma y cartón) en distintas disposiciones respecto de la fuente (2 y 1,7 metros). También se colocaron distintas superficies del material, modificando a su vez la separación entre la sonda y la muestra. De igual forma se realizaron ensayos con tres espaciadores distintos de la sonda de intensidad. Todos los resultados obtenidos con esta técnica se compararon con los obtenidos en el tubo de impedancia.

**RESULTADOS OBTENIDOS**

Las medidas se realizaron para intervalos de frecuencia de tercios de octava y de todos los ensayos realizados, mostraremos los que entendemos son más ilustrativos de los aspectos que queremos destacar. El material que mejor cumplía con las condiciones de muestreo que deseábamos es la lana de roca de 50 Kg/m<sup>3</sup> de densidad y de 50 mm de espesor. La distancia entre el centro de la sonda de intensidad y la muestra era de 50 mm (mínimo posible), el espaciador de 12 mm y la distancia entre la fuente y la muestra de 2 metros. Con esta configuración aseguramos un campo sonoro incidente relativamente plano, un rango de frecuencias de medida suficientemente amplio (100 – 5000 Hz) y una absorción sonora del material relativamente alta en todo el margen de frecuencias.

En las gráficas de la figura 2 se representan los valores obtenidos para el coeficiente de absorción por los dos procedimientos: Tubo de impedancia, que lo identificamos como tubo y Técnica Intensimétrica que lo señalamos por la longitud del separador. En este caso la lana de roca tiene una densidad de 50 kg.m<sup>-3</sup> y una distancia entre la fuente y la muestra de 2 m con un espaciador de 12 mm. Según se deduce de las gráficas, el valor obtenido coincide apreciablemente para frecuencias medias y altas y se diferencian a frecuencias bajas.

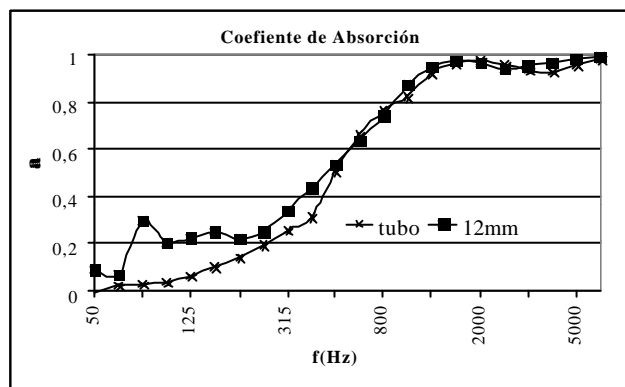


Fig. 2.- Valor del coeficiente de absorción  $\alpha$ , en función de la frecuencia, medido por los dos métodos.

En las gráficas de la figura 3 exponemos los valores obtenidos para el módulo de la impedancia en función de la frecuencia para la misma geometría anterior y para el mismo material (lana de roca). En esta figura existen dos zonas muy diferenciadas, para frecuencias bajas los valores divergen considerablemente mientras que conforme aumenta la frecuencia los valores se van acercando continuamente hasta la frecuencia comprendida entre 400 y 500 Hz en que se aproximan mucho y a partir de aquí se mantienen casi idénticos. Este resultado pone de manifiesto que la medida por uno

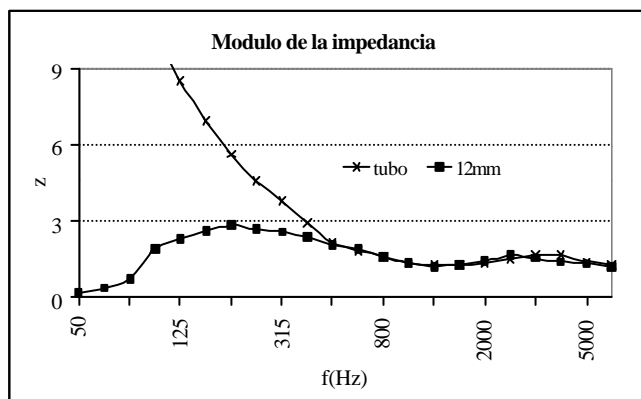


Fig. 3.- Valores del módulo de la impedancia, en función de la frecuencia, medidos por los dos métodos.

de los dos procedimientos no es válida a frecuencias bajas. El error se presenta en la técnica de intensidad debido a la reactividad del campo sonoro ya que en este margen de frecuencias el material es poco absorbente y prácticamente toda la energía incidente se refleja. Por tanto no podemos aplicar esta técnica para frecuencias inferiores a los 400Hz.

En la figura 4 se representan los valores de la fase de la impedancia medida por ambos métodos para el mismo material y la misma geometría o montaje, es decir,  $\rho = 50 \text{ kg.m}^{-3}$ ; distancia = 2 m; espaciador de 12 mm. Según se observa en la gráfica, los valores obtenidos se aproximan mucho, para todas las frecuencias, lo que nos indica que la medida de este parámetro por ambos métodos es fiable en todo el rango de frecuencias.

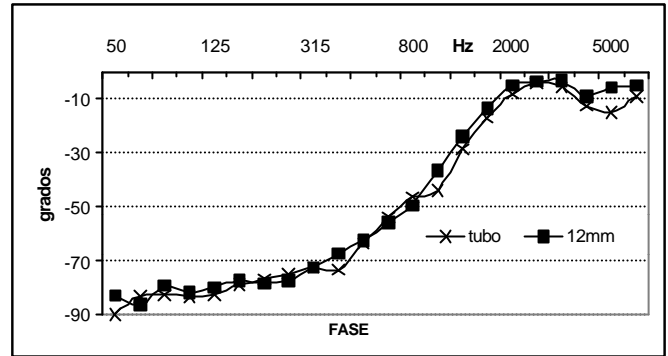


Fig. 4.- Valores de la fase, en función de la frecuencia, medida por los dos métodos.

Para asegurarnos de que la "causa" del error en la medida del módulo de la impedancia, es la reactividad del medio, en la figura 5 mostramos los valores de la reactividad del campo y los correspondientes al índice de capacidad dinámica de la cadena de medida en función de la frecuencia. Como puede observarse el índice de reactividad del medio es superior al índice de capacidad dinámica para frecuencias inferiores a 400 Hz y es inferior para frecuencias más altas. Este límite es el que nos sirve de referencia para poder asumir como válidas las medidas realizadas con la sonda de intensidad.

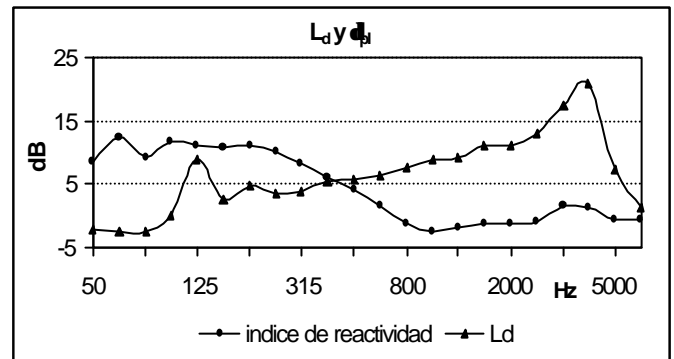


Fig. 5.- Comparación entre la capacidad dinámica de la cadena de medida y el índice de reactividad. (lana de roca  $\rho = 50 \text{ kg.m}^{-3}$ ;  $d = 2 \text{ m}$ ; espaciador = 12 mm).

Este efecto se observó también al ensayar con otros materiales menos absorbentes. Por ejemplo, al medir la impedancia acústica de una espuma de 2 cm de espesor, y una absorción sensiblemente menor que la de la lana de roca en todo el rango de frecuencias, los valores del módulo de la impedancia empezaban a ser coincidentes a partir de los 800 Hz. Esto lo podemos apreciar en la figura 6. En esta situación, la reactividad del campo sonoro en el punto de medida es mayor que en el caso de la lana de roca (materiales más absorbentes).

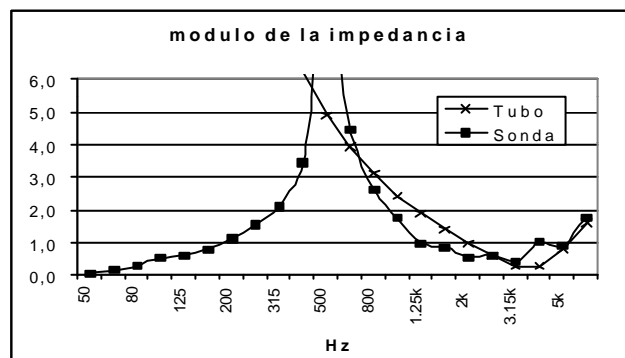


Fig. 6.- Valores del módulo de la impedancia de una espuma de 2 cm de espesor, en función de la frecuencia, medidos por los dos métodos.

## CONCLUSIONES

Del estudio realizado podemos deducir que la medida de la impedancia, utilizando la técnica de la intensimetría acústica, ofrece indudables ventajas, sobre todo para medidas "in situ", pero es muy susceptible de cometer errores que es preciso acotar y evaluar correctamente como es la reactividad del campo. También es fundamental adecuar las distancias entre muestra y fuente así como de los micrófonos a la muestra y la separación de micrófonos. En condiciones de muestreo válidas la técnica ofrece resultados bastante coherentes.

**BIBLIOGRAFIA**

ALLARD, J. F., AKNINE, A., '*Acoustic Impedance Measurements with a Sound Intensity Meter*'. Applied Acoustics 18, 69-75 (1985).

CHAMPOUX, Y., L'ESPÉRANCE, A., '*Numerical evaluation of errors associated with the measurement of acoustic impedance in a free field using two microphones and a spectrum analyzer*'. Journal Acoustical Society of America 84, 30-38 (1988).

FAHY, F. J., '*Sound Intensity*'. Elsevier Applied Science (1989).