



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Desarrollo de un prototipo de tubo de impedancia basado en el método de la función de transferencia

Maristany, A.R.¹; Abadía, L.¹; Moyano, D.A.¹

¹ Universidad Nacional de Córdoba, FAUD-CIAL, Córdoba, Argentina. amaristany@unc.edu.ar

Resumen

En esta ponencia se describe el desarrollo y puesta en marcha de un prototipo de tubo de impedancia, destinado a medir el coeficiente de absorción acústica de materiales, a partir de la función de transferencia, de acuerdo a la metodología planteada por la ISO 10534-2. Se propuso la construcción de un tubo en PVC mediante impresora 3D. El prototipo es un sistema basado en cuatro secciones modulares: (1) fuente sonora, (2) prolongación, (3) extremo y (4) porta muestras. En el acondicionamiento acústico de locales es fundamental obtener coeficientes de absorción acústica confiables de los materiales utilizados. En general se disponen de dos métodos estandarizados para la determinación de coeficientes de absorción acústica de materiales: en cámara de reverberación, según la ISO 354 y en tubo de impedancia, de acuerdo a las ISO 10534, parte 1, método de onda estacionaria y parte 2, método por función de transferencia. La medición en cámara está destinada a obtener de manera precisa el comportamiento en campo difuso, pero el método requiere de importantes superficies de muestras, a veces no disponibles, insumiendo un tiempo de medición razonable. La medición en tubo de impedancia es un método alternativo de especial interés, pues, si bien la caracterización que se obtiene del material es bajo incidencia normal, los tiempos de medición son más cortos y el tamaño de las muestras se reduce al diámetro del aparato lo cual facilita su disponibilidad. Esta metodología permite obtener rápidamente valores relativamente confiables del comportamiento acústico del material. Se muestran los resultados de reproducibilidad, tomando como referencia muestras de un mismo material medidas con otros métodos: en cámara reverberante y/o en tubo de impedancia de onda estacionaria.

Palabras-clave: Absorción acústica, instrumentación, coeficientes, materiales acústicos

PACS: 43.55.Ev

Development of an impedance tube prototype based on the transfer function method

Abstract

This paper describes the development and implementation of an impedance tube prototype, intended to measure the acoustic absorption coefficient of materials, from the transfer function, according to the methodology proposed by ISO 10534-2. The construction of a PVC tube using a 3D printer was proposed. The prototype is a system based on four modular sections: (1) sound source, (2) extension, (3) end and (4) sample holder. In the acoustic conditioning of premises, it is essential to obtain reliable acoustic absorption coefficients of the materials used. In general, there are two standardized methods for determining the acoustic absorption coefficients of materials: in a reverberation chamber, according to ISO 354, and in an impedance tube, according to ISO 10534, part 1, the standing wave method and part 2, transfer function method. The camera measurement is intended to accurately obtain the behavior in the diffuse field, but the method requires large sample surfaces, sometimes not available, taking a reasonable measurement time. The measurement in an impedance tube is an alternative method of special interest, since, although the characterization obtained from the material is under normal incidence, the measurement times are shorter and the size of the samples is reduced to the diameter of the apparatus, which facilitates its availability. This methodology allows to quickly obtain relatively reliable values of the acoustic behavior of the material. The results of reproducibility tests are shown, taking as reference samples of the same material measured with other methods: in a reverberant chamber and/or in a standing wave impedance tube.

Keywords: Acoustic absorption, instrumentation, coefficients, acoustic materials



1. INTRODUCCION

En el acondicionamiento acústico interior de locales es indispensable lograr que el sonido emitido desde la fuente se distribuya de manera homogénea y llegue de manera óptima al oyente. Los materiales utilizados en las distintas superficies se comportan de manera diferente ante la incidencia del sonido. Gran parte de los materiales utilizados para lograr una buena respuesta acústica en un local poseen la capacidad de absorber el sonido, por lo que es necesario determinar el coeficiente de absorción acústico de cada material.

Las propiedades de absorción de un material se obtienen mediante el coeficiente de absorción (α) de ese material. Los datos de coeficientes de absorción confiables son fundamentales para el acondicionamiento acústico interior de recintos.

La medición del coeficiente de absorción (α) puede obtenerse mediante dos métodos estandarizados: de manera tradicional con medición en cámara de reverberación [1] y en tubo de impedancia [2] [3]. En cámara de reverberación la caracterización acústica de materiales se realiza en campo difuso, y se requiere de muestras para prueba de gran tamaño, superior a 10 m², con espacios debidamente acondicionados y equipamiento costoso para realizar la medición e insumiendo un tiempo de medición razonable. La medición en cámara de reverberación se basa en la norma UNE-EN ISO354:2004 “Medición de absorción acústica en cámara reverberante”.

El tubo de impedancia es una técnica alternativa para la medición de coeficientes de absorción caracterizándose por su bajo costo y gran efectividad [4] [5]. Esta técnica es de especial interés, pues, si bien la caracterización que se obtiene del material es bajo incidencia normal, los tiempos de medición son más cortos y el tamaño de las muestras se reduce al diámetro del aparato lo cual facilita su disponibilidad. Está metodología de medición permite obtener rápidamente valores relativamente confiables del comportamiento acústico del material.

En el CIAL se realizan mediciones en tubo de impedancia con la técnica tradicional en tubo de ondas estacionarias y basado en la norma ISO

10354 parte 1 método de ondas estacionarias, así como también mediciones en cámara reverberante basadas en la norma UNE-EN ISO 354:2004.

La onda estacionaria dentro del tubo se establece a partir de la emisión de tonos puros, por lo tanto, para cada frecuencia de interés debe realizarse un recorrido a lo largo del tubo con la sonda del micrófono, para localizar las crestas y valles correspondientes a dicha onda. Además, como la geometría del tubo condiciona el rango de frecuencias que pueden ser ensayadas, cuando se requiere caracterizar un material entre 100 y 5000 Hz, se hace necesario cambiar el tubo de impedancia por otro de diferente diámetro y longitud y, en consecuencia, el tamaño de la muestra. Por lo anterior, la medición de una muestra para caracterizarla en el rango de 100 a 5000 Hz, por tercios de octava puede insumir entre 30 y 40 minutos, sin considerar la preparación de las muestras.

Con la finalidad de obtener un sistema que permita realizar mediciones rápidas y confiables del coeficiente de absorción acústica de materiales, se planteó la alternativa de utilizar un tubo de impedancia basado en la función de transferencia. La razón de preferir este método sobre el de ROE, es la posibilidad de utilizar un tubo de menores dimensiones y que al trabajar con ruido rosa en vez de tonos puros, la medición es más rápida. Se describe el prototipo desarrollo y los primeros resultados de mediciones comparadas con las realizadas en cámara de reverberación en el tubo de ondas estacionarias.

2. DESCRIPCION DEL PROTOTIPO

Se describe el desarrollo de un prototipo de tubo de impedancia, destinado a medir el coeficiente de absorción acústica de materiales, a partir de la función de transferencia, de acuerdo a la metodología planteada por la ISO 10534-2. “Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia”.

Se propuso la construcción del tubo en plástico mediante impresora 3D, basado en el

antecedente del uso de PVC en tubos de impedancia [6]. La impresora que se utiliza impone como condición, limitar la máxima longitud de tubo a 200 mm. Como las frecuencias bajas de interés requieren distancias entre micrófonos superiores a esta medida, se decidió que la estructura del tubo fuera modular y ensamblable. De este modo, las longitudes de tubo que se podrían obtener serían múltiplos de 200 mm.

Se optó por la geometría cilíndrica, respetándose los condicionantes dados por ISO 10534-2/4.2 y 4.3 para el rango de frecuencias de interés, el cual se estableció entre 100 y 4000 Hz. De este modo:

- Diámetro interior del tubo: 40 mm
- Distancia del micrófono más cercano a la fuente: 189 mm
- Distancia del micrófono más cercano a la muestra: 11 mm

Resultados de estudios realizados por otros autores [7] a partir de múltiples mediciones de materiales absorbentes muestran que el tubo pequeño cubre un amplio rango de frecuencias ($f = 100 \text{ Hz} - 7 \text{ kHz}$), y por lo tanto se puede usar para identificar las propiedades del material acústico en bajas frecuencias en lugar de usar el tubo grande.



Figura 1: Piezas del tubo de impedancia construidas en impresora 3d.

El prototipo es un sistema basado en cinco secciones modulares que se ensamblan una a continuación de otra: (1) sección fuente sonora, (2) sección prolongación, (3) sección extremo, (4) porta muestras y (5) sección fuente. La figura 1 muestra las cinco piezas descritas.

Las 3 primeras piezas, tienen un diámetro interior de 40 mm, un espesor de 5 mm y una longitud de 200 mm. El porta muestras tiene un diámetro interior de 50 mm, un espesor de 5 mm y una longitud de 100 mm. En su interior se desplaza ajustado un émbolo de caras planas. Sobre la cara del émbolo que incidiría el frente de ondas, se montó una moneda de acero de 50 mm de diámetro y 8 mm de espesor. La sección fuente y la sección extremo, incluyen un soporte que permite el montaje del micrófono.

El soporte del micrófono es un paralelepípedo rectangular cuya base esta curvada para apoyar sobre el tubo. Tiene dos orificios para alojar al micrófono en dos posiciones diferentes, separadas entre sí por 21 mm. El diámetro de los orificios es de 12,75 mm y se calibró para que los micrófonos tengan un deslizamiento ajustado en su interior. La longitud de los agujeros, incluyendo el espesor de pared del tubo es de 93 mm. De este modo, el micrófono quede al ras de la superficie interior del tubo (ISO 10534-2/ 4.5).

La figura 2 muestra el tubo armado y montado sobre sendos pies de apoyo.

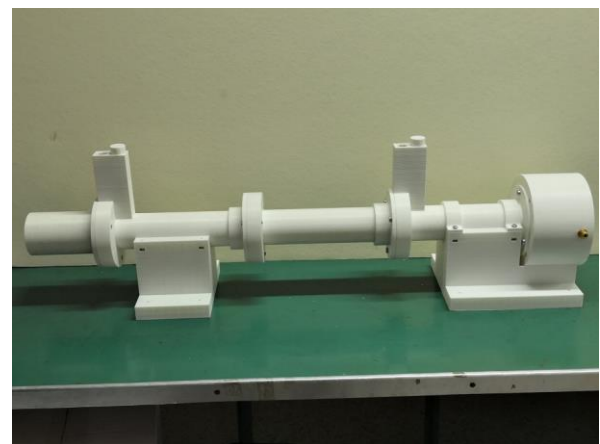


Figura 2: Conjunto armado.

La figura 3 muestra un esquema del tubo de impedancia basado en el método de la función de transferencia entre dos micrófonos. En esta figura pueden observarse las localizaciones de la fuente, la muestra y los micrófonos. x_1 y x_2 corresponden a las distancias entre la muestra y el micrófono 1 y el 2 respectivamente. El frente de ondas recorre el tubo desde la fuente a la muestra, incidiendo en ella normalmente.

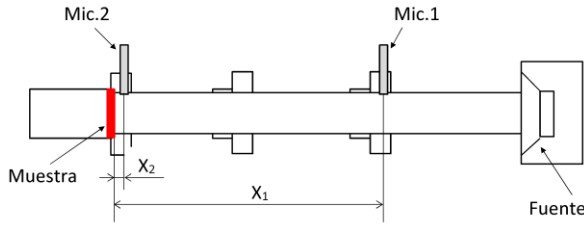


Figura 3: Esquema del tubo de impedancia basado en el método de la función de transferencia.

La figura 4 muestra la configuración del sistema de medición, formado por: 2 micrófonos Berhinger ECM 8000, Interfaz USB TASCAM US-4X4, amplificador Peavey CS-800X, fuente: parlante SICA 4E1CS, PC + aplicación y tubo de impedancia

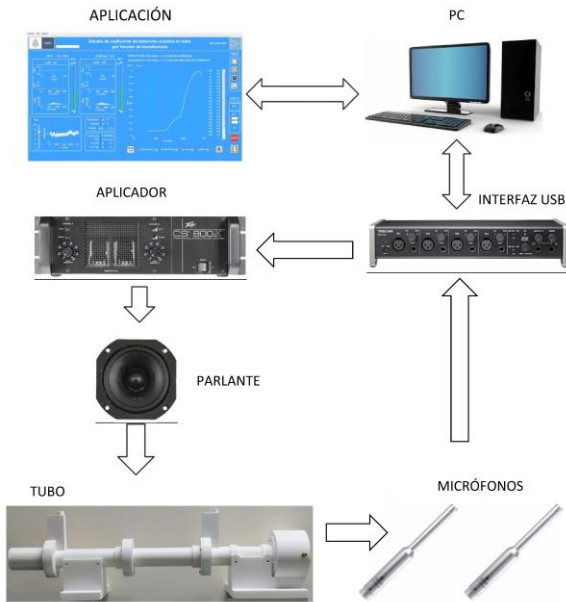


Figura 4: Sistema de medición.

La determinación del coeficiente de absorción acústica se basa en la obtención del coeficiente de reflexión r , a partir de la función de transferencia H'_{12} (1) entre los micrófonos (ISO 10534-2/ 7.6 y 7.7). Estos conceptos se desarrollaron en la aplicación de PC, para obtener una curva representativa en el rango de frecuencias de interés.

$$H'_{12} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{e^{j2kx_2} + r}{\gamma e^{j2kx_1} + r} e^{jk(x_1 - x_2)} \quad (1)$$

Siendo r el coeficiente de reflexión de la muestra.

La PC utilizada posee un procesador Intel Core i5 – 3 GHz – 8 Gb RAM.

La frecuencia de muestreo es de 44100 muestras por segundo, tanto para la adquisición como para la emisión.

La aplicación posee tres ambientes operativos:

Medición.

Parámetros de sonido.

Calibración.

En el ambiente de medición se realiza la medición de la muestra. Se monitorea el nivel de sonido de cada micrófono y su contenido espectral. Se puede seleccionar el tipo de sonido a emitir (ruido rosa, blanco, marrón, MLS, tono puro). Se puede ajustar la cantidad de promediados para obtener la función de transferencia. El coeficiente de absorción acústica de la muestra se presenta en una curva y una tabla de valores, obtenidos en fracciones de octava seleccionables. La aplicación muestra la curva calculada del coeficiente de absorción en el rango de frecuencias de interés, a medida que realiza los promediados.

También se muestra la curva de la función de transferencia en módulo y fase y el coeficiente de reflexión.

La aplicación permite guardar la función de transferencia entre los dos micrófonos H'_{12} y exportar en formato txt la tabla de datos del coeficiente de absorción acústica.

En el ambiente de parámetros de sonido se puede ajustar la frecuencia de muestreo para la adquisición y la emisión. También permite ajustar la sensibilidad de los micrófonos en mV/Pa .

En el ambiente de calibración, se realiza la calibración para compensar los desajustes de los micrófonos en amplitud y fase (ISO 10534-2/7.5). En este ambiente pueden guardarse y recuperarse las funciones de transferencia H'_{12} y H''_{12} .

3. MEDICIONES

Se realizaron mediciones con 9 muestras diferentes, de tipo poroso. Las muestras fueron evaluadas en el tubo por función de transferencia propuesto, en tubo Bruel & Kjaer basado en el método del rango de la onda estacionaria y en cámara de reverberación por los métodos de ruido interrumpido (ISO 354) y barridos senoidales.

Los materiales utilizados, que se muestran en figura 5, son los siguientes:

- Panel rígido de lana de vidrio de 20 mm de espesor
- Terciopelo de 390 gr/m² extendido sobre soporte rígido
- Lana de oveja blousse 30 mm + fieltro 7mm
- Lana de oveja blousse 50 mm + fieltro 7mm
- Fieltro gris de 4 mm
- Fieltro beige 8 mm
- Espuma poliéster 24 mm
- Alfombra tipo boucle 5 mm (roja)
- Alfombra tipo boucle 5 mm (gris)



Figura 5: Muestras utilizadas

El tubo se excitó con ruido rosa, en el rango de 50 a 5000 Hz. El ruido de fondo máximo en el interior del tubo es de 53 dB en las bandas de 315 a 630 Hz. El nivel sonoro en el interior del tubo se estableció en 95 dB, para garantizar la condición de la amplitud de la señal (ISO 10534-2 /7.5).

Los micrófonos fueron calibrados individualmente con el calibrador B&K 4231 a 1kHz. Se realizó con un nivel de 94 dB, ajustando el parámetro de sensibilidad del micrófono en el ambiente de parámetros de sonido. Se verificó el rango dinámico a 114 dB. La diferencia observada entre los micrófonos quedó en 0.1 dB (ISO 10534-2 /E1.3).

Precisión de la función de transferencia (ISO 10534-2 /E.3). La coherencia entre los micrófonos, para materiales absorbentes es superior a 0.99 en el rango de frecuencias de interés. Cuando las muestras son fuertemente reflectantes, la coherencia baja hasta 0.92 para frecuencias de 2000 y 3000 Hz. En consecuencia, para 100 promediados en la determinación de la función de transferencia, el error normalizado con materiales absorbentes es menor a 0.7%, mientras que para materiales reflectantes es inferior al 2%.

Se observa que el comportamiento de las curvas responde a lo que se esperaría de las muestras utilizadas en líneas generales. En efecto el coeficiente de absorción es bajo en bajas frecuencias y tiende a aumentar en frecuencias medias y altas. En las gráficas de las figuras 6 a 14 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de cada uno de los materiales en tubo de función de transferencia (FT), en tubo de ondas estacionarias (ROE) y eventualmente en cámara de reverberación (CR).

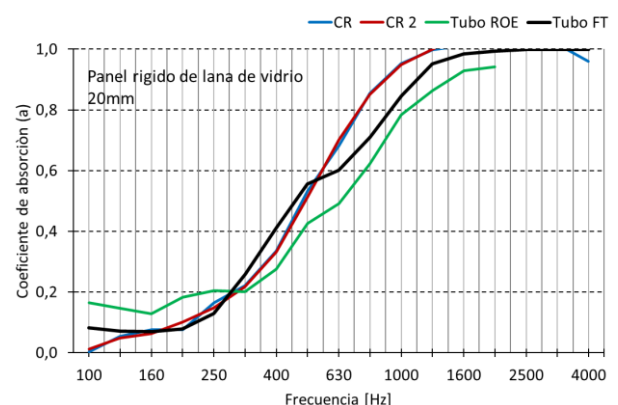


Figura 6: Coeficientes de absorción: Panel rígido de lana de vidrio de 20 mm de espesor

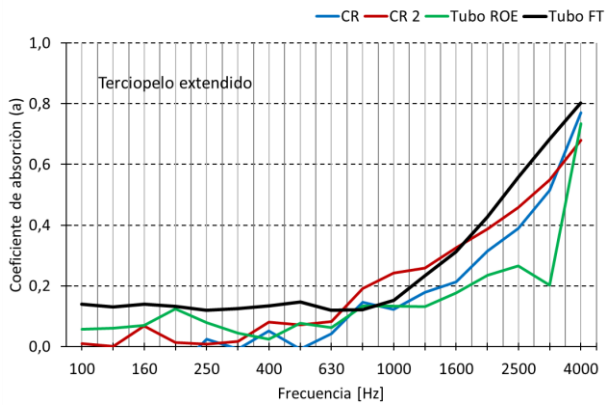


Figura 7: Coeficientes de absorción: Terciopelo de ... gr/m2 extendido sobre soporte rígido

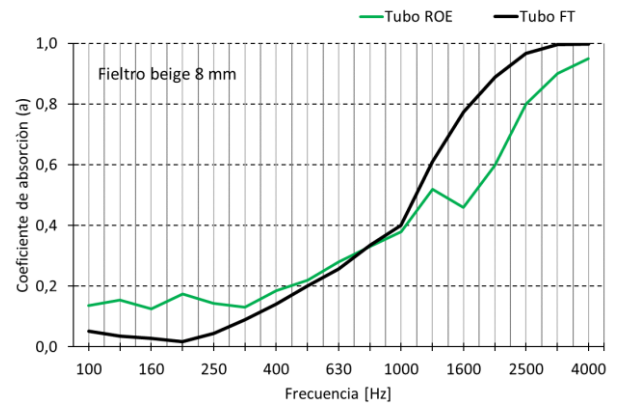


Figura 11: Coeficientes de absorción: Filtro beige 4 mm

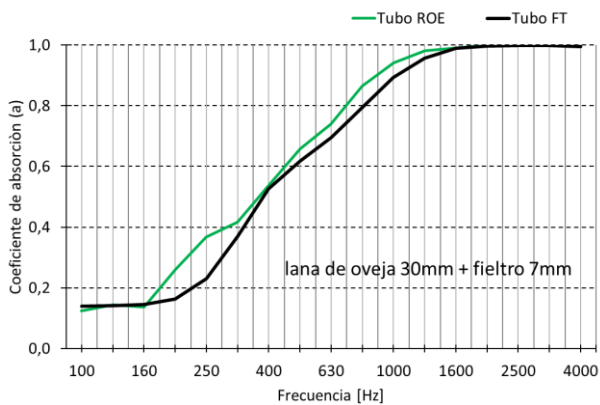


Figura 8: Coeficientes de absorción: Lana de oveja blousse 30 mm + fieltro 7mm

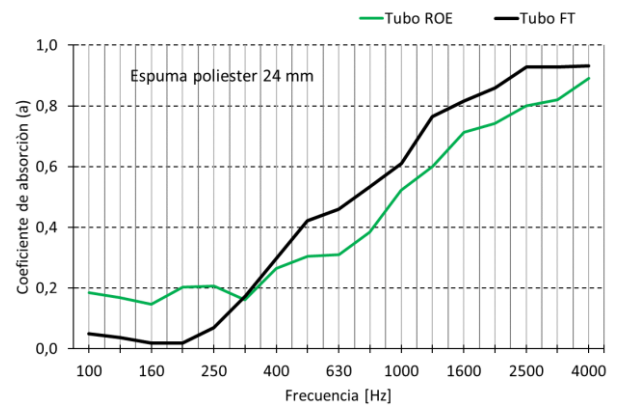


Figura 12: Coeficientes de absorción: Espuma poliester 24 mm

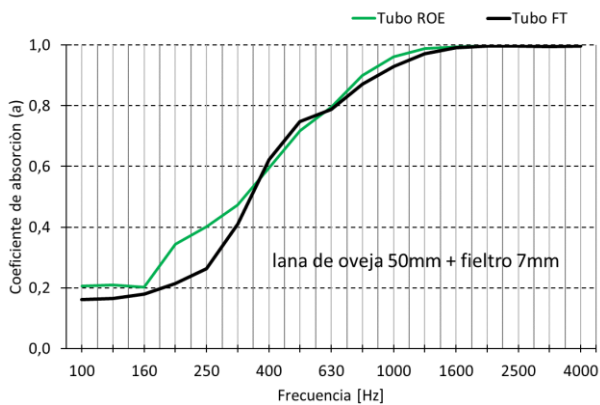


Figura 9: Coeficientes de absorción: Lana de oveja blousse 50 mm + fieltro 7mm

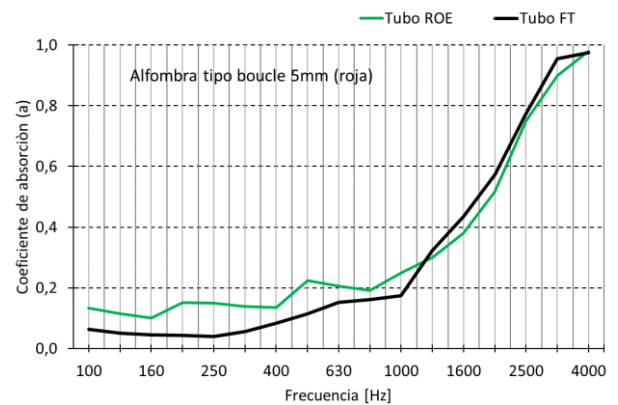


Figura 13: Coeficientes de absorción: Alfombra tipo boucle 5 mm (roja)

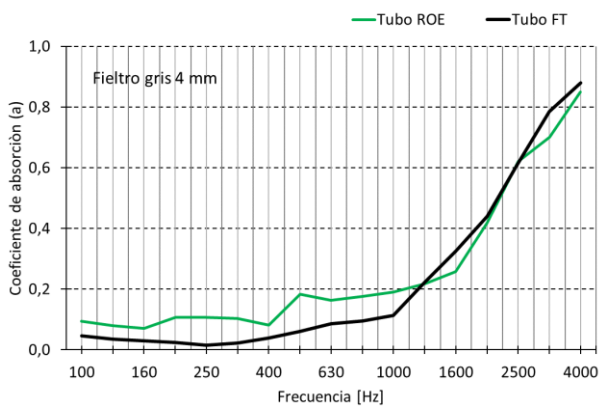


Figura 10: Coeficientes de absorción: Filtro gris de 4 mm

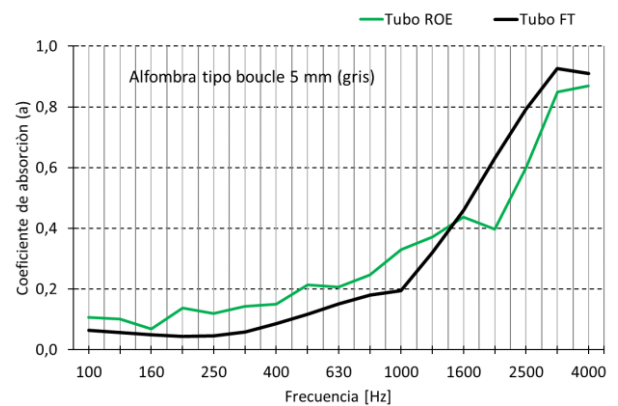


Figura 14: Coeficientes de absorción: Alfombra tipo boucle 5 mm (roja)

Para cada uno de los casos se calcularon los términos o índices de número único que caracterizan un material absorbente acústico

Tabla 1: Términos de número único y error en la medición del coeficiente de absorción respecto a la medición en tubo ROE o CR

Material	Índice	Método			Dif.
		CR	ROE	FT	
Panel rígido de lana de vidrio de 20 mm	NRC	0,63	0,57	0,60	0,04
	SAA	0,66	0,57	0,63	0,05
	α_w	0,45 (MH)	0,45 (MH)	0,45 (MH)	0,00
Terciopel o de 390 gr/m2 extendido	NRC	0,17	0,16	0,26	0,10
	SAA	0,12	0,12	0,20	0,07
	α_w	0,15 (H)	0,15 (H)	0,20 (H)	0,05
Lana de oveja 30 mm + fieltro 7mm	NRC	-	0,69	0,66	-0,03
	SAA	-	0,73	0,69	-0,04
	α_w	-	0,65 (MH)	0,55 (MH)	-0,10
Lana de oveja 50 mm + fieltro 7mm	NRC	-	0,72	0,70	-0,03
	SAA	-	0,76	0,73	-0,03
	α_w	-	0,70 (MH)	0,60 (MH)	-0,10
Panel rígido con velo negro	NRC	-	0,56	0,63	0,08
	SAA	-	0,55	0,64	0,09
	α_w	-	0,40 (MH)	0,55 (MH)	0,15
Fieltro gris de 4 mm	NRC	-	0,27	0,24	-0,03
	SAA	-	0,22	0,17	-0,05
	α_w	-	0,50 (H)	0,45 (H)	-0,05
Fieltro beige 8 mm	NRC	-	0,40	0,42	0,03
	SAA	-	0,35	0,39	0,04
	α_w	-	0,35 (H)	0,25 (H)	-0,10
Espuma poliéster 24 mm	NRC	-	0,45	0,49	0,04
	SAA	-	0,43	0,50	0,06
	α_w	-	0,40 (MH)	0,40 (MH)	0,00
Alfombra tipo boucle 5 mm (roja)	NRC	-	0,34	0,31	-0,03
	SAA	-	0,28	0,24	-0,04
	α_w	-	0,25 (H)	0,20 (H)	-0,05
Alfombra tipo boucle 5 mm (gris)	NRC	-	0,33	0,31	-0,01
	SAA	-	0,28	0,26	-0,02
	α_w	-	0,30 (H)	0,30 (H)	0,00

Una manera usual de evaluar la absorción acústica de un material es a partir del coeficiente de reducción de ruido (NRC). El NRC es un valor único que representa la capacidad de absorción de un material, calculado en base a 16

frecuencias de banda de tercio de octava de 125 a 4000 Hz.

Como alternativa al NRC la ASTM C423 09a [8] propone el promedio de absorción de sonido (SAA). El SAA es una clasificación de número único similar al NRC, excepto que los valores de absorción de sonido empleados en el promedio se corresponden con las doce bandas de tercio de octava de 200 Hz a 2500 Hz, ambos inclusive, y el redondeo es al múltiplo más cercano de 0.01. Finalmente, la ISO 11654 [9] propone el uso de un valor único independiente de la frecuencia, el coeficiente α_w , a diferencia de los anteriores este índice no se corresponde con una premedicación de los coeficientes por frecuencia, por el contrario, es el valor alcanzado a 500 Hz por una curva de referencia propuesta y desplazada de acuerdo al procedimiento indicado por la norma. Se calcularon los índices de números único NRC, SAA y α_w para cada uno de los materiales ensayados y se calculó el error en función de estos índices (tabla 1).

4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

La tabla 1 muestra los datos de los índices NRC, SAA y α_w , así como también la diferencia de cada índice para cada tipo de medición. Las mediciones fueron realizadas en un tubo Bruel & Kjaer basado en el método del rango de la onda estacionaria (ROE) (ISO 10534-1), eventualmente en cámara de reverberación (CR) (UNE-EN ISO354:2004) y en el tubo de función de transferencia (ISO 10534-2 /E.3)

Se observa que, en la mayoría de las muestras medidas existe una correlación entre los datos obtenidos, existiendo diferencias razonables, las cuales deberán ser consideradas al momento de realizar los ajustes de los datos obtenidos a través de cada método. Las mediciones con el tubo de función de transferencia pueden ser considerado como un método alternativo a la hora de obtener datos confiables y publicables referidos a los coeficientes de absorción de materiales

5. CONSIDERACIONES FINALES

Se ha desarrollado un instrumento para la determinación del coeficiente de absorción



acústica de materiales de bajo costo, portable, liviano y modular. Las diferencias, errores, en los valores obtenidos en las mediciones son satisfactorias, y están dentro de los márgenes de aplicación posible del equipamiento desarrollado. Los micrófonos utilizados con este instrumento no son específicos de la aplicación y, en consecuencia, pueden ser utilizados en otras aplicaciones.

Se han obtenido los coeficientes de absorción acústica de una serie de 9 materiales porosos diferentes, en el rango de las frecuencias de interés, comparando los mismo con los resultados alcanzados mediante mediciones realizadas por tubo de ondas estacionarias y cámara de reverberación, con un importante ajuste de la las curvas de compartimiento del material por cualquiera de los métodos. Se han calculado los índices o valores de número único NRC, SAA y α_w , las diferencias alcanzadas permiten definir un margen de error bajo, por lo cual los resultados del coeficiente de absorción medidos con esta técnica pueden ser utilizado como valor de referencia u de orientación para verificar el comportamiento del material.

Comparado con el método ROE, y CR el método de la función de transferencia provee información en todas las frecuencias del rango de interés y la velocidad del proceso de medición es muy superior (2,5 minutos en el método de FT, contra 30 a 40 minutos del método ROE), y aún más tiempo en CR con la necesaria disponibilidad de importantes superficies de muestras. El ahorro en tiempo se multiplica por la cantidad de muestras que se necesiten procesar.

A futuro se procurará acordar con otros laboratorios la medición de muestras e intercambiar el resultado de las mediciones para validar el instrumento y establecer su alcance.

REFERENCIAS

[1] ISO 354:2003 Acoustics -- Measurement of sound absorption in a reverberation room

[2] ISO 10534-1:1996. Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 1: Method using standing wave ratio.

[3] ISO 10534-2 :1998 Acoustics — Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes — Part 2: Transfer-function method.

[4] Deshpande, S. (2013). Development of a low cost impedance tube to measure the acoustic absorption and transmission loss of materials. American Society for Engineering Education, 121 ASEE Annual Conference & Exposition, 2014.

[5] Castañeda, J. A., & Álvaro González, H. (2004). Medición del coeficiente de absorción del sonido. *Scientia Et Technica*, 2(25). <https://doi.org/10.22517/23447214.7219>

[6] Cândido da Silva G., Araújo Nunes M., Vilela Lopes R., Boson Almeida A. Design and construction of a low cost impedance tube for sound absorption coefficients measurements. 22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013) November 3-7, 2013, Brazil.

[7] Koruk, Hasan, An assessment of the performance of impedance tube method. *Noise Control Engineering Journal*, Volume 62, number 4, july 2014, pp. 264-274 (11). DOI: <https://doi.org/10.3397/1/376226>

[8] ASTM C423-09a Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method

[9] ISO 11654:1997(en) Acoustics — Sound absorbers for use in buildings — Rating of sound absorption