

MEDIDA DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN EN EL LABORATORIO DE ACÚSTICA PARA ESTUDIANTES DE GRADO

PACS: 43.10 Sv

Macho-Stadler, Erica; Elejalde-García, María Jesús.
Departamento de Física Aplicada I. Escuela de Ingeniería de Bilbao. UPV/EHU.
Plaza Ingeniero Torres Quevedo 1.
48013 Bilbao.
España.
Tel: 946014257; 946014256
E-Mail: erica.macho@ehu.eus; mariajesus.elejalde@ehu.eus

Palabras Clave: coeficiente de absorción, tubo de impedancias, educación

ABSTRACT

Learning outcomes of undergraduate Acoustics Laboratory courses include the ability to model systems, design experiments, and analyze data. We present a simple experiment for the study of the normal absorption coefficient of acoustics insulators used in noise control. The impedance tube-standing wave method is applied (ISO-10534-1). Results show the change of the absorption coefficient with the frequency and the sample thickness. In order to evaluate the accuracy of the teaching laboratory system, the results have been compared with those obtained with a commercial system according to standard ISO-10534-2.

RESUMEN

El laboratorio de Acústica para estudiantes de grado incluye habilidades de modelado de sistemas, diseño experimental y análisis de resultados. Presentamos un experimento sencillo para el estudio del coeficiente de absorción en incidencia normal de aislantes acústicos utilizados en el control del ruido, que utiliza el método de onda estacionaria en un tubo de impedancias (ISO-10534-1). Los resultados muestran la variación del coeficiente de absorción con la frecuencia y el espesor de la muestra. Para evaluar la fiabilidad de sistema experimental utilizado, los resultados se han comparado con los que se obtienen con un sistema comercial conforme al estándar ISO10534-2.

INTRODUCCIÓN

Debido al crecimiento de las aplicaciones relacionadas con la acústica y el ruido, las técnicas experimentales utilizadas en estos campos son cada vez más complejas. En consecuencia, parece conveniente que los estudiantes de grados científico-técnicos tengan la oportunidad de formarse en los fundamentos y el manejo de estas técnicas. Recientemente, la Asociación Americana de Profesores de Física ha publicado algunas recomendaciones para los resultados de aprendizaje de los laboratorios de grado, que incluyen las capacidades de modelar sistemas, diseñar experimentos y analizar datos [1].

Los absorbentes acústicos juegan un papel importante en el control del ruido. Una de las ventajas que ofrecen es que su forma y su espesor pueden variarse para adecuarlos a requisitos específicos. Cuando se quiere realizar un diseño, resulta útil poder predecir la absorción acústica de un material en función de algunas propiedades fácilmente medibles como espesor o frecuencia. En este contexto, las técnicas experimentales parecen una buena herramienta para el estudio del efecto de los absorbentes acústicos en diferentes condiciones [2-4]. Las principales dificultades que aparecen en la medida de la absorción acústica de materiales absorbentes son su heterogeneidad, la preparación de las muestras y algunos errores experimentales. Además, es importante señalar que no existen materiales de referencia con los que comparar los resultados obtenidos.

Se define el coeficiente de absorción en la frontera entre dos medios como el cociente entre la intensidad absorbida y la intensidad incidente. Existen tres métodos estándar para medir la absorción acústica: cámara reverberante [5], onda estacionaria en un tubo de impedancias [6] y función de transferencia en un tubo de impedancias [7]. Estos tres métodos no permiten realizar mediciones in situ. Los métodos para medir la absorción in-situ son variaciones del tubo de impedancias [8, 9].

Los métodos que utilizan un tubo de impedancias parecen la mejor alternativa para que estudiantes de grado realicen medidas de absorción sonora, ya que el método de la cámara reverberante exige unas instalaciones que no suelen estar disponibles en un laboratorio docente. Además, la cantidad de muestra necesaria en un tubo de impedancias es mucho menor que en una cámara reverberante, lo que también facilita su manipulación durante los experimentos (montaje, etc.). Un tubo de impedancias permite investigar la propagación de ondas sonoras y la formación de ondas estacionarias. Un altavoz, situado en uno de los extremos del tubo, produce una onda acústica que se propaga por el tubo y se refleja en el otro extremo. La interferencia entre la onda incidente y la reflejada, da como resultado la formación de ondas estacionarias. Si se coloca una muestra de material absorbente en el extremo del tubo donde la onda se refleja, parte de la energía incidente es absorbida por la muestra, por lo que las ondas incidente y reflejada tienen diferentes amplitudes. La ISO-10534-1 proporciona un método experimental para calcular el coeficiente de absorción de la muestra en estas condiciones. Este procedimiento se puede reproducir fácilmente utilizando material disponible en un laboratorio docente de Física o Acústica.

En este trabajo proponemos realizar un estudio experimental del coeficiente de absorción de algunos aislantes acústicos utilizando material disponible en el laboratorio docente. El trabajo experimental se centra en el cambio del coeficiente de absorción con la frecuencia y con el espesor de la muestra. Además, se han realizado las mismas medidas utilizando un sistema comercial que cumple la norma ISO-10534-2. La comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos permite evaluar la precisión del sistema del laboratorio docente. La propuesta es adecuada para estudiantes de grado de ingeniería, arquitectura y otros campos científicos que necesitan conocimientos y comprensión de las vibraciones y las ondas, y también de las propiedades de los materiales. Comenzamos por un breve resumen de las bases teóricas de los métodos de onda estacionaria y función de transferencia en un tubo de impedancias y continuamos con la parte experimental. Posteriormente presentamos algunos resultados obtenidos con los dos sistemas experimentales y los comparamos. Finalmente, sugerimos algunas otras posibilidades que pueden explorarse con las mismas técnicas.

TEORÍA

Cuando las ondas sonoras alcanzan una superficie, se reflejan o se absorben. El sonido absorbido puede ser transmitido o disipado. La energía sonora se disipa por la acción simultánea

de mecanismos viscosos y térmicos. La cantidad de energía reflejada o absorbida depende de las propiedades acústicas de la superficie. El coeficiente de absorción α es una magnitud utilizada para medir la absorción acústica de un material. Si I_i es la intensidad incidente y I_r la intensidad reflejada,

$$\alpha = \frac{I_i - I_r}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i}$$

que varía entre 0 y 1. Se sabe que α no depende de la intensidad incidente, pero sí de la frecuencia y del ángulo de incidencia. Para incidencia normal, suele denotarse α_n . La forma más simple de estimar α_n es utilizar un tubo de impedancias.

Método de Onda Estacionaria en un Tubo de Impedancias (Método OE)

Este método fue descrito por primera vez por Taylor en 1913 [10]. Utiliza un tubo rígido de longitud L en el que se propaga el sonido producido por un altavoz situado en uno de sus extremos (tubo de impedancias). Si el diámetro del tubo es pequeño comparado con la longitud de onda, se produce una onda sonora plana que se propaga a lo largo del eje del tubo. Cuando la onda llega al otro extremo del tubo, puede reflejarse. Las reflexiones sucesivas en ambos extremos del tubo dan lugar a ondas estacionarias y fenómenos de resonancia [11-13].

Si el altavoz se sitúa en $x=0$, emitiendo un sonido armónico, y la muestra se sitúa en $x=L$, el campo sonoro resultante en el tubo es la superposición de una onda que se mueve en el sentido positivo del eje del tubo ($+x$) y otra moviéndose en el sentido negativo ($-x$):

$$p = p_0(e^{-jkx} + re^{+jkx})$$

donde p_0 es la amplitud de la onda de presión que viaja en $+x$. La ecuación tiene en cuenta que la onda reflejada ($-x$) puede estar atenuada por un coeficiente de reflexión r . En general, la reflexión también puede producir una diferencia de fase entre la onda incidente y la reflejada, por lo que el coeficiente de reflexión r puede representarse mediante un número complejo de módulo R y fase φ . El campo sonoro resultante puede escribirse como la suma de una onda estacionaria p_s y otra que viaja en la dirección x , p_f :

$$p = 2p_0r \cos(kx) + p_0(1-r)e^{-jkx} = p_s + p_f$$

La dependencia espacial del valor cuadrático medio (rms) de p^2 :

$$(p^2)_{rms} = \frac{1}{2}|p^2| = \frac{1}{2}pp^* = \frac{1}{2}p_0^2[1 + R^2 + 2R \cos(2kx + \varphi)]$$

varía entre un valor máximo de $\frac{1}{2}[p_0(1+R)]^2$ y uno mínimo de $\frac{1}{2}[p_0(1-R)]^2$. Por tanto el cociente entre el valor máximo y el valor mínimo de la amplitud de presión de la onda estacionaria es:

$$\frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{\sqrt{[p_0(1+R)]^2/2}}{\sqrt{[p_0(1-R)]^2/2}} = \frac{1+R}{1-R}$$

A partir de esta última ecuación, pueden calcularse el módulo del coeficiente de reflexión R y el coeficiente de absorción para incidencia normal:

$$R = \frac{(p_{\max}/p_{\min}) - 1}{(p_{\max}/p_{\min}) + 1} \rightarrow \alpha_n = 1 - \frac{l_r}{l_i} = 1 - R^2 = \frac{4(p_{\max}/p_{\min})}{[(p_{\max}/p_{\min}) + 1]^2}$$

Este método requiere un tiempo de medida bastante largo, ya que en cada experimento se mide una sola frecuencia. Para conseguir medir las presiones en el interior tubo sin alterar el campo sonoro, se suele utilizar un micrófono miniatura [14, 15].

Método de Función de Transferencia en un Tubo de Impedancias (Método FT)

Este método utiliza también un tubo de impedancias. El altavoz se sitúa en uno de los extremos del tubo y la muestra en el otro. El altavoz emite ruido y se generan ondas planas. El campo sonoro se mide con la ayuda de dos micrófonos (1 y 2) montados sobre la pared del tubo:

$$p_1 = p_+ e^{-jk\ell} + p_- e^{+jk\ell}, \quad p_2 = p_+ e^{-jk(\ell+s)} + p_- e^{+jk(\ell+s)}$$

siendo p_+ la onda viajera incidente, p_- la onda viajera reflejada, ℓ la distancia entre la muestra y el micrófono 1 y s la distancia entre los dos micrófonos. A partir de estas ecuaciones pueden calcularse los valores de p_+ y p_- y, con ellos, el coeficiente de reflexión a partir de la función de transferencia ($H_{12}=p_2/p_1$) y el coeficiente de absorción para incidencia normal:

$$r = \frac{p_-}{p_+} = e^{-j2k\ell} \frac{p_1 e^{-jks} - p_2}{p_2 - p_1 e^{+jks}} = e^{-j2k\ell} \frac{e^{-jks} - H_{12}}{H_{12} - e^{+jks}} \rightarrow \alpha_n = 1 - |r|^2$$

Este método requiere un tiempo de medida menor que el de onda estacionaria, ya que utiliza ruido y permite medir muchas frecuencias simultáneamente. Para ello el sistema experimental debe incluir un analizador de frecuencias [16, 17].

EXPERIMENTAL

Se han utilizado dos montajes diferentes para medir α_n en varias muestras (Figura 1).

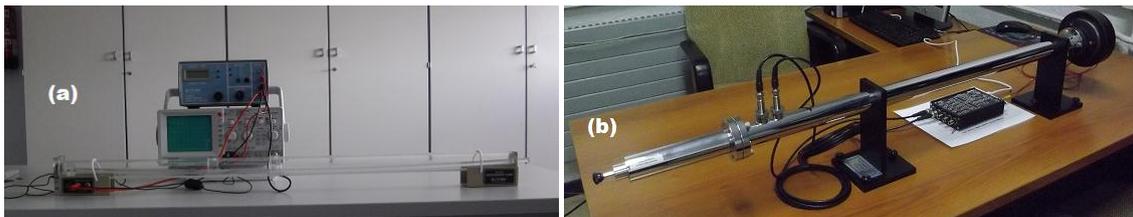


Figura 1: Montaje experimental para los dos métodos utilizados: (a) método de onda estacionaria y (b) método de función de transferencia

Método de Onda Estacionaria

Se ha utilizado el tubo de resonancia WA-9612 de PASCO disponible en el laboratorio docente [18]. El sistema incluye un tubo de plástico de 90 cm de longitud y radio interior 31.4 mm, un altavoz, un micrófono miniatura, un generador de funciones y un osciloscopio (Figura 1a).

El procedimiento para medir α_n , a una frecuencia f , es el siguiente:

- ✓ Colocar el altavoz en uno de los extremos del tubo y la muestra en el extremo opuesto. Conectar el altavoz al generador de funciones y elegir en éste la señal armónica. Conectar el micrófono a la entrada vertical del osciloscopio y el generador de funciones a la entrada horizontal del osciloscopio. Seleccionar la frecuencia de medida.

- ✓ Insertar el micrófono dentro del tubo y aproximarlos a la muestra. Mover el micrófono hasta encontrar un máximo de presión p_{\max} . Medir este valor en el osciloscopio.
- ✓ Mover el micrófono hasta detectar un mínimo de presión p_{\min} . Medir este valor en el osciloscopio. Es importante que el mínimo elegido sea el más cercano a la muestra, para evitar errores debidos a la atenuación del sonido dentro del tubo.
- ✓ Determinar el valor de α_n utilizando la ecuación

$$R = 4(p_{\max}/p_{\min}) / [(p_{\max}/p_{\min}) + 1]^2$$

- ✓ Repetir la medida varias veces y calcular el valor medio de α_n y su error.

Método de Función de Transferencia

Se ha utilizado el sistema de medida ACUPRO de Spectronics que se muestra en la Figura 1b. Este aparato utiliza el método de la función de transferencia para la medida de α_n y cumple las normas ISO 10534-2 y ASTM E-1050 [19].

El diámetro interior del tubo es 34.9 mm y su longitud total 1.20 m. La fuente sonora se coloca en uno de los extremos del tubo y la muestra en el otro. El valor de la presión se mide en dos puntos del tubo. La distancia entre la muestra y el micrófono más cercano es $l=50.8$ mm. La distancia entre los dos micrófonos es $s=29.21$ mm. El rango de frecuencias del sistema varía entre 50 y 5700 Hz. El módulo de adquisición de datos es un analizador de señal integrado en el software del instrumento. Acabada la medida, el software calcula el coeficiente de absorción. Todos los resultados pueden almacenarse en archivos txt para su posterior manipulación.

Muestras

Se han utilizado muestras de aislantes acústicos que combinan diferentes espumas de poliuretano compactadas y comprimidas (Reconstituted Foam). Estos materiales son porosos. Se dispone de muestras de dos densidades: 80 kgm^{-3} (RF80) y 150 kgm^{-3} (RF150). Las muestras son cilindros con ambas caras planas y paralelas, como muestra la Figura 2.



Figura 2: Muestras utilizadas: RF80 (izquierda) y RF150 (derecha).

RESULTADOS

El trabajo experimental se centra en el cambio del coeficiente de absorción con la frecuencia y con el espesor del material. Para controlar el efecto de la heterogeneidad del material en los resultados, se han utilizado siempre las mismas muestras con la misma cara colocada hacia la fuente sonora. Los resultados obtenidos para el efecto de la densidad en el coeficiente de absorción pueden consultarse en [20].

Comportamiento con la Frecuencia

Para el método de función de transferencia (método FT), se han realizado medidas entre 50 y 5700 Hz. En el caso del método de onda estacionaria (método OE), debido a la lentitud del método, la primera elección han sido las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava

para audio entre 50 y 5700 Hz. Sin embargo, teniendo en cuenta que el sistema “Standing Wave Apparatus Type 4002” de Bruel&Kjaer [21], utiliza frecuencias entre 800 y 6500 Hz para un tubo de 29 mm de diámetro, se han eliminado todas las frecuencias menores que 800 Hz. Por tanto las frecuencias utilizadas han sido: 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000 y 5000 Hz.

La tabla 1 muestra los valores α_n (con su error correspondiente) obtenidos para una muestra de RF80 de 40mm de espesor y otra de RF150 de 20mm de espesor. Se incluyen también los datos referenciados por el fabricante (medidas según ISO 10534-2).

Muestra RF80 de 40mm de espesor				Muestra RF150 de 20mm de espesor		
f (Hz)	Fabricante	Método OE	Método FT	Fabricante	Método OE	Método FT
800		0.67±0.07	0.64±0.01		0.51±0.07	0.31±0.01
1000	0.91	0.73±0.05	0.81±0.01	0.46	0.51±0.07	0.42±0.01
1250		0.85±0.04	0.92±0.01		0.55±0.09	0.60±0.01
1600		0.97±0.01	0.98±0.01		0.63±0.09	0.74±0.01
2000	0.94	0.99±0.01	0.95±0.01	0.90	0.79±0.06	0.90±0.01
2500		0.92±0.02	0.87±0.01		0.94±0.05	0.99±0.01
3150		0.88±0.02	0.84±0.01		0.96±0.02	0.97±0.01
4000		0.95±0.02	0.91±0.01		0.88±0.05	0.91±0.01
5000		0.98±0.01	0.98±0.01		0.89±0.05	0.80±0.01

Tabla 1: Coeficiente de absorción en incidencia normal para las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava entre 800 y 5000 Hz.

Comportamiento con el Espesor del Material

Para muestras de RF80 se han realizado medidas para espesores de 20, 30 y 40 mm. Para muestras de RF150 se han realizado medidas para espesores de 20 y 40 mm. La figura 3 muestra los resultados obtenidos con los dos sistemas experimentales. Las líneas continuas corresponden a las medidas del sistema ACUPRO (método FT) y los puntos a las correspondientes al sistema del laboratorio docente de PASCO (método OE).

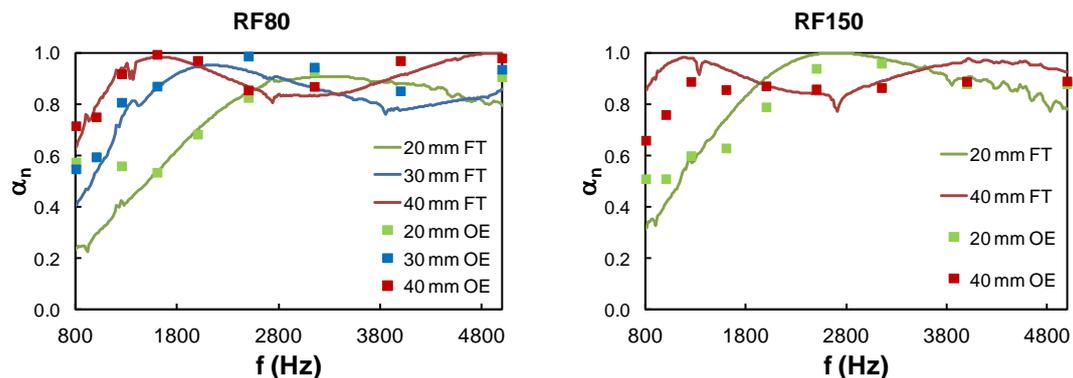


Figura 3: Variación de α_n con el espesor del material. Medidas obtenidas con el sistema ACUPRO (método FT) y el sistema del laboratorio docente de PASCO (método OE).

Discusión

Los resultados muestran que α_n crece con la frecuencia hasta alcanzar un valor máximo entre 0.8 y 1. Una vez alcanzado el máximo, las variaciones de α_n son menos importantes.

Para muestras del mismo material, el espesor parece una propiedad determinante: cuando el espesor de la muestra aumenta el coeficiente de absorción a frecuencias bajas también aumenta. Para materiales porosos, la absorción acústica se produce por una doble pérdida de energía de las ondas acústicas: por un lado la pérdida debida a la vibración de las fibras que componen el material y por otro la debida a la fricción del aire con el esqueleto del material. Estudios sobre la absorción acústica en materiales porosos han concluido que la absorción acústica de baja frecuencia tiene relación directa con el espesor [22]. La regla general es que la absorción acústica efectiva de un absorbente poroso se consigue cuando el grosor del material es aproximadamente una décima parte de la longitud de onda del sonido incidente. Si consideramos que una "absorción acústica efectiva" ocurre cuando el coeficiente de absorción es mayor que 0.6, nuestros resultados experimentales coinciden esta regla.

Un material poroso tiene una estructura de poros abiertos. Cuando el aire lo atraviesa, la energía se transforma en calor debido a la fricción de las moléculas de aire con las paredes de los poros. Se disipa más energía cuando las moléculas de aire se mueven a una velocidad mayor, lo que ocurre a $\lambda/4$ y $3\lambda/4$ de la superficie (λ longitud de onda). Por tanto, el material absorbe más a aquellas frecuencias para las que el valor de $\lambda/4$ es menor que su espesor. Cuando el espesor de la muestra disminuye por debajo de $\lambda/4$, la absorción es menos efectiva y α_n disminuye. Como puede comprobarse en la figura 3, alrededor de esa frecuencia aparece el pico de absorción. Una vez superado el pico de absorción, el valor de α_n vuelve a disminuir debido a la menor velocidad de las moléculas de aire.

Los resultados obtenidos para α_n con el sistema experimental disponible en el laboratorio docente de PASCO (método OE) ofrecen un acuerdo bastante bueno con los obtenidos para las mismas muestras con el sistema ACUPRO que cumple la ISO 10534-2 (método FT). Esta conclusión se basa tanto en el valor obtenido para α_n como en su error.

Para el método de onda estacionaria, el coeficiente de absorción depende del cociente de las variables independientes p_{\max} y p_{\min} . Puede comprobarse fácilmente que el error de α_n depende de $(1/p_{\min})$. Cuando p_{\min} disminuye, y por tanto la relación señal-ruido es menor, el error en la medida de α_n aumenta. En este trabajo, esta circunstancia aparece normalmente para muestras más finas y frecuencias más bajas, como muestra la tabla 1. En el caso de la figura 3 los resultados son similares, y el error de medida varía entre 0.01 y 0.2. Por tanto, el método OE utilizado en este trabajo puede identificar correctamente el coeficiente de absorción en incidencia normal de aislantes acústicos en el rango de frecuencias entre 800 y 5000 Hz, si se tienen en cuenta los errores de medida.

CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un procedimiento experimental para medir el coeficiente de absorción acústica utilizando el material disponible en el laboratorio docente. El sistema utiliza un tubo de impedancias y el procedimiento se basa en la norma ISO 10534-1. Las curvas de absorción obtenidas para algunos absorbentes porosos con este sistema son similares a las que aparecen generalmente en la literatura. Se ha analizado el efecto de la frecuencia y el grosor del material en el coeficiente de absorción acústica. Los resultados muestran que estos materiales son más eficaces para absorber sonidos de alta frecuencia y que su eficacia depende del espesor y su relación con la longitud de onda del sonido ($\text{espesor} \geq \lambda/4$).

Al no existir materiales de referencia certificados para calibrar el sistema experimental, se ha comprobado la exactitud de los resultados por comparación con resultados obtenidos para las mismas muestras con un sistema conforme a la norma ISO 10534-2. El acuerdo entre los dos métodos para frecuencias entre 800 y 5000 Hz es razonablemente bueno. La diferencia entre los

valores obtenidos con ambos métodos ha sido inferior al 15%, excepto en las frecuencias más bajas y para las muestras más delgadas. En estos casos, la incertidumbre del sistema del laboratorio docente aumenta debido a la disminución de la relación señal-ruido.

La propuesta está dirigida a estudiantes de tercer o cuarto cursos de grado de ingeniería, arquitectura y otros campos científico-técnicos, en los que el conocimiento y la comprensión de cuestiones relacionadas con las ondas y los materiales son importantes. El aprendizaje en el laboratorio les permite descubrir la realidad de la física experimental de una forma activa. Las actividades les animan a pensar en lo que están aprendiendo y a desarrollar habilidades como el pensamiento crítico. La principal ventaja de la técnica propuesta es que los experimentos pueden realizarse utilizando equipos cuyo manejo es importante para muchos campos experimentales, por ejemplo generadores de funciones y osciloscopios. Cada grupo de estudiantes debe configurar el equipo, conectar correctamente el generador y el osciloscopio entre ellos y con el resto de aparatos. Además, en cada etapa del estudio, tienen que verificar que los criterios del procedimiento experimental (extraído de la norma ISO 10534-1) se satisfacen correctamente. Posteriormente, antes de recoger datos, deben elegir las frecuencias de medida (intervalo y paso) teniendo en cuenta las características del tubo y que el sonido utilizado es armónico. Al final, tienen que analizar y representar los resultados obtenidos.

Para concluir, sugerimos una posibilidad interesante que puede explorarse con la misma técnica. El estudio básico propuesto en este trabajo, podría ampliarse a muestras que alternan capas de material y aire y que son muy utilizadas en construcción [23].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AAPT Committee on Laboratories, AAPT Recommendations for the undergraduate physics laboratory curriculum. *The Physics Teacher* 53 (2015) 253
- [2] S. Fatima y A.R. Mohanty, Acoustical and fire-retardant properties of jute composite materials. *Applied Acoustics* 72 (2011) 108-114
- [3] P.V. Bansod, T. Mittal y A.R. Mohanty, Study on the acoustical properties of natural jute material by theoretical and experimental methods for building acoustics applications. *Acoustics Australia* 44 (2016) 457-472
- [4] R. Maderuelo-Sanz, A.V. Nadal-Gisbert, J.E. Crespo-Amorós, J.M. Barrigón Morillas, F. Parres-García y E. Juliá Sanchis, Influence of the microstructure in the acoustical performance of consolidated lightweight granular materials. *Acoustics Australia* 44 (2016) 149-157
- [5] ISO 354:2003: Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room
- [6] ISO 10534-1:1996: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 1: Method using standing wave ratio
- [7] ISO 10534-2:1998: Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes - Part 2: Transfer-function method
- [8] BS EN 1793-5:2016: Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. In situ values of sound reflection under direct sound field conditions
- [9] E. Brandao, A. Lenzi y P. Stephan, A review of the in-situ impedance and sound absorption measurement techniques. *Acta Acustica united with Acustica* 101 (2015) 443-463
- [10] H.O. Taylor, A direct method of finding the value of materials as sound absorbers. *Physical Review* 2 (1913) 270-287
- [11] M. Möser, *Engineering Acoustics* (Springer-Verlag 2009)
- [12] L.L. Beranek, *Acoustical measurement* (American Institute of Physics 1988)
- [13] P.M. Morse, *Vibration and sound* (American Institute of Physics 1981)
- [14] H.J. Sabine, Notes on acoustics impedance measurements. *Journal of the Acoustical Society of America* 14 (1942) 127

- [15] L.L. Beranek, Some notes on the measurement of acoustic impedance. *Journal of the Acoustical Society of America* 19 (1947) 420-427
- [16] A.F. Seybert y D.F. Ross, Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random excitation technique. *Journal of the Acoustical Society of America* 61 (1977) 1362-1370
- [17] G. Müller y M. Möser (ed.), *Handbook of Engineering Acoustics* (Springer-Verlag 2013)
- [18] PASCO, https://www.pasco.com/prodCatalog/WA/WA-9612_resonance-tube/
- [19] Spectronics' ACUPRO impedance Tube, www.spectronics.net
- [20] E. Macho-Stadler y M.J. Elejalde-García, Measurement of the sound absorption coefficient for an advanced undergraduate physics laboratory. *European Journal of Physics* 38 (2017) 055703
- [21] Bruel&Kjaer, *Standing Wave Apparatus Type 4002 - Instructions manual* (1979)
- [22] H.S. Seddeq, Factors influencing acoustic performance of sound absorptive materials. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* 3 (2009) 4610-4617
- [23] M.M. Muhammad *et al*, The effect of air gap thickness on sound absorption coefficient of polyurethane foam. *Defence Science & Technology Technical Bulletin* 5 (2012) 176-187