

MEDICIÓN DEL MÓDULO DE COMPRESIBILIDAD DINÁMICO A BAJA FRECUENCIA DE MATERIALES ABSORBENTES ACÚSTICOS

PACS: 43.55.Ev

Alba Fernández, Jesús; Rodríguez Vercher, Juan Carlos.
Centro de Tecnologías Físicas. Universitat Politècnica de València. Escola Politècnica Superior de Gandia. C/ Paraninf, 1. Grao de Gandia. España. 962 849 333. jesalba@fis.upv.es; juarodve@upvnet.upv.es.

del Rey Tormos, Romina.
Centro de Tecnologías Físicas. Universitat Politècnica de València. Escola Politècnica Superior d'Alcoi. Plaza Ferrandis-Carbonell s/n. Alcoi. España. 966 528 400. roderey@fis.upv.es.

Palabras Clave: control del ruido, materiales porosos, módulo de compresibilidad, dispositivos de medida, métodos acústicos.

ABSTRACT.

Sound-absorbing materials are commonly used for noise control. To acoustically characterize them, the complex bulk modulus, K , and the complex density, ρ , are needed. If both parameters are known, the complex impedance and propagation constant of the material can be obtained. With these parameters, it is possible to model the behavior of the material in different situations of interest for noise control.

Models exist to obtain K and ρ . These models usually depend on other variables, such as airflow resistivity, thermal characteristic length, viscous characteristic length, porosity, etc. If information on these variables is not available, the only option is to measure.

The measurement of the complex bulk modulus, K , of porous materials in the low-frequency range is not straightforward. In this work, a low-frequency device for its measurement, based on published work, is implemented. This device is based on an electroacoustic analogy, which simplifies the propagation expressions and allows measurement with only two microphones. The dynamic compressibility modulus, K , of different types of acoustic absorbing materials measured with this device is presented in this work.

RESUMEN.

Los materiales absorbentes acústicos se usan comúnmente para el control del ruido. Para caracterizarlos acústicamente, se necesita el módulo de compresibilidad complejo, "complex bulk modulus", K , y la densidad compleja, ρ . Si se conocen ambos parámetros, se pueden obtener la impedancia compleja y la constante de propagación del material. Con ellos pueden modelarse comportamientos del material en diferentes situaciones de interés de control de ruido. Existen modelos para obtener K , y ρ . Estos modelos suelen depender de otras variables, como son la resistividad del flujo de aire, la longitud térmica característica, la longitud característica viscosa, la porosidad, etc. Si no se dispone de información de estas variables, la única opción es medir.

La medida del "complex bulk modulus", K , de materiales porosos en el rango de baja frecuencia no es sencilla. En este trabajo se pone en marcha un dispositivo para baja frecuencia para su medida, basado en trabajos publicados. Este dispositivo se basa en una analogía electroacústica, que simplifica las expresiones de propagación y permite medir con sólo dos micrófonos. Se presenta en este trabajo el módulo de compresibilidad dinámico, K , de diferentes tipos de materiales absorbentes acústicos medidos con este dispositivo.

1. INTRODUCCIÓN

El módulo de compresibilidad complejo, K , junto con la densidad compleja, ρ , es uno de los parámetros utilizados habitualmente para la caracterización acústica de materiales porosos [1]. A partir de éstos es posible determinar la impedancia característica, Z_c , y la constante de propagación característica, k_c , que, a su vez, permiten predecir las propiedades absorbentes del material.

El módulo de compresibilidad complejo se puede obtener mediante modelos, como el planteado por Johnson, Champoux y Allard [2, 3] y sus posteriores variantes. Sin embargo, estos modelos requieren de un elevado número de parámetros de entrada, como son la resistividad del flujo de aire, la tortuosidad, la porosidad y las longitudes características térmicas y viscosas. Si no se dispone de todos estos parámetros, quedará la opción de tratar de inferir algunas propiedades mediante técnicas de inversión [4] o bien tratar de medir directamente el módulo de compresibilidad.

La medida del módulo de compresibilidad de materiales porosos en el rango de baja frecuencia no es sencilla. A lo largo de la historia se han presentado algunos métodos para su medida, utilizando diferentes técnicas, como las basadas en la medida de variaciones de presión para la obtención de las compliancias dinámicas [5–7], las que hacen uso de la holografía [8] o las basadas en medidas acústicas [9–11].

En este trabajo se pone en marcha un dispositivo para su medida en baja frecuencia, basado en el trabajo publicado por Napolitano et al. [11], que utiliza medidas acústicas para determinación del módulo de compresibilidad complejo de forma indirecta. Este método utiliza el dispositivo propuesto por Dragonetti et al. [12] para la medida de la resistencia al flujo y se basa en una analogía electroacústica, que simplifica las expresiones de propagación y permite determinar el módulo de compresibilidad a partir de las medidas obtenidas con dos micrófonos.

A lo largo de los siguientes apartados se describirá el marco teórico sobre el que se apoya el método utilizado y se presentarán los resultados obtenidos para el módulo de compresibilidad dinámico, K , de diferentes tipos de materiales absorbentes acústicos medidos con este dispositivo.

2. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

Para la medida del módulo de compresibilidad complejo se ha seguido el procedimiento descrito por Napolitano et al. en [11], basado en el concepto electroacústico de la compliancia a baja frecuencia ($f < 500$ Hz), suponiendo elementos concentrados (*lumped elements*). A partir de la analogía electroacústica de propagación de onda dentro de un medio poroso, se da una derivación analítica del método de medición que permite la obtención del módulo de compresibilidad complejo, K , de materiales porosos en el rango de baja frecuencia.

Para llevar a cabo las medidas, se utiliza un dispositivo similar al planteado por Dragonetti et al. en [12] para la medida de la resistencia al flujo del aire. A diferencia de otras técnicas, requiere el uso de sólo dos micrófonos, uno de ellos colocado en la cavidad que contiene la muestra a analizar y el otro en la caja del altavoz (ver Figura 1). Los autores del presente trabajo ya han utilizado también una variación del dispositivo original para realizar ensayos de resistencia al flujo del aire mediante técnicas electroacústicas [13], a partir de la medida de la impedancia eléctrica.

El método propuesto proporciona resultados fiables cuando la impedancia viscosa longitudinal dentro del medio es insignificante con respecto a la impedancia térmica transversal. El rango de validez de los resultados se mantiene hasta que se cumple la condición $abs(kd) = 0.5$, donde k es el número de onda y d es el espesor del material poroso.

En el trabajo de Napolitano et al. en [11] se plantean dos variantes para la medida, una primera con la cavidad superior del dispositivo completamente llena de material y una segunda en la que

sólo se rellena una parte de la cavidad superior con material, dejando el micrófono correspondiente a la parte superior al aire. En ambos casos, se realiza una medida de calibración con la cavidad superior vacía, en la que se obtienen los volúmenes acústicos de las cavidades, teniendo en cuenta el espacio ocupado por el altavoz instalado entre ambas dos.

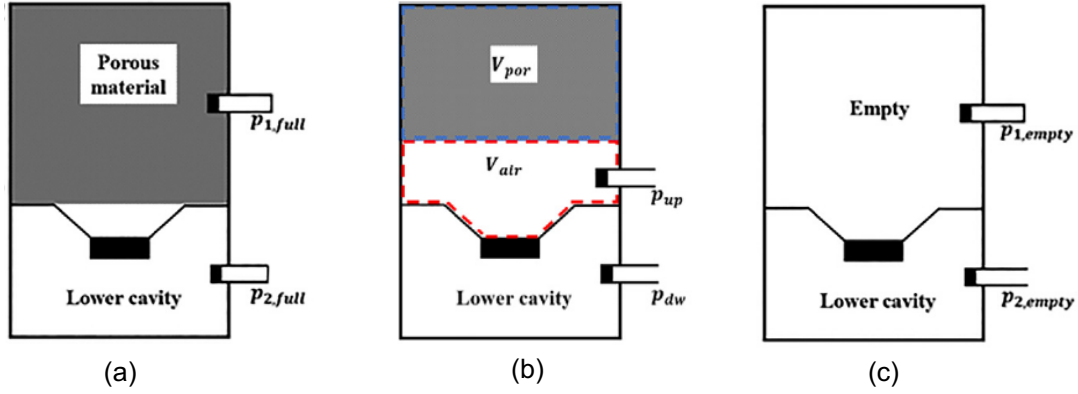


Figura 1 – Montaje para la medida del módulo de compresibilidad complejo con la cavidad superior completamente rellena de material (a), parcialmente rellena (b) y vacía (c) [11].

2.1. Medida con el sistema vacío

Para el caso en el que la cavidad superior se encuentra vacía, se puede obtener la compliancia acústica mediante la ecuación 1.

$$C_{Aempty} = \frac{V_{empty}}{\gamma p_m}, \quad (1)$$

donde V_{empty} es el volumen vacío considerando el volumen del cono del altavoz, que se obtiene durante el proceso de calibración, γ es la relación entre calores específicos, y p_m es la presión ambiente. En este caso, cabe recordar que el denominador es el módulo de compresibilidad del aire y que, por tanto, el valor resultante para C_{Aempty} es real.

El módulo de compresibilidad y la densidad del aire en condiciones normales ($T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $p_m = 1 \text{ atm}$) son respectivamente $K = 1.42 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$, $\rho_m = 1.21 \text{ kg/m}^3$ ($c_0 = 343.6 \text{ m/s}$ en esas condiciones) y la razón de calor específico en estas condiciones es $\gamma = 1.41$.

2.2. Medida con la cavidad superior completamente rellena de material

En el caso en el que se rellena la cavidad superior completamente rellena (*full*) de material absorbente, la compliancia acústica viene dada por la ecuación 2.

$$C_{Afull} = \frac{V_{full}\varphi}{K}, \quad (2)$$

donde aparecen la porosidad, φ , y el módulo de compresibilidad complejo, K . Por tanto, en este caso el valor de C_{Afull} será complejo.

Si se plantean las admitancias acústicas, para el caso del sistema vacío se obtiene:

$$\frac{U}{p} = -j\omega C_{A\text{down}} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} - j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma p_m} \quad (3)$$

mientras que para el caso del sistema con la parte superior rellena:

$$\frac{U}{p} = -j\omega C_{A\text{down}} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{full} - j\omega \frac{V_{up}\varphi}{K}. \quad (4)$$

Puesto que en ambos casos la impedancia superficial está caracterizada por las mismas condiciones de contorno, se pueden igualar y despejar K , en función de la porosidad, obteniendo:

$$\frac{K}{\varphi} = \frac{\gamma p_m}{1 - \frac{V_{down}}{V_{up}} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{full} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} \right)} \quad (5)$$

2.3. Medida con la cavidad superior parcialmente rellena de material

En el caso en el que se rellena la cavidad superior solo parcialmente de material, en la analogía electroacústica aparece una asociación en paralelo con dos compliancias, la del aire y la del material. Esto modifica la ecuación de la admitancia acústica, quedando tal y como se indica en la ecuación 6, para el caso semilleno (*semifull*):

$$\left(\frac{U}{p} \right)_{semifull} = -j\omega C_{A\text{down}} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{semifull} - \frac{1}{Z_{Atot}}, \quad (6)$$

donde Z_{Atot} representa la asociación en paralelo:

$$\frac{1}{Z_{Atot}} = \frac{1}{Z_{Air}} + \frac{1}{Z_{AK}}. \quad (7)$$

Igualando las admitancias de nuevo, obtenemos:

$$-j\omega C_{A\text{down}} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{semifull} - \frac{1}{Z_{Atot}} = -j\omega C_{A\text{down}} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} - j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma p_m} \quad (8)$$

$$\frac{1}{Z_{Atot}} = j\omega C_{A\text{down}} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{empty} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{semifull} \right) + j\omega \frac{V_{empty}}{\gamma p_m} \quad (9)$$

Finalmente, igualando las ecuaciones 7 y 9, obtenemos las siguientes relaciones que permitirán determinar el valor de K :

$$Z_{Air} = \frac{\gamma p_m}{j\omega V_{air}} \quad (10)$$

$$Z_{AK} = \frac{K}{j\omega V_{por}\varphi} \quad (11)$$

$$V_{up} = V_{por} + V_{air} \quad (12)$$

3. RESULTADOS

Para la realización de los ensayos se utilizaron diferentes tipos de materiales, aunque con la finalidad de poder comparar con los resultados del trabajo original se presentan únicamente dos de las configuraciones ensayadas. Concretamente, se ha escogido la melamina de 6 cm de espesor y una espuma de poliuretano de 4 cm de espesor, cuyos detalles se presentan en la

Tabla 1. Estos materiales se han elegido dados sus valores de resistividad al flujo dentro del orden de los utilizados en el trabajo original de Napolitano et al. [11].

Tabla 1 – Propiedades de los materiales utilizados

Material	Espesor (mm)	Densidad (kg/m ³)	σ (kNs/m ⁴)
Espuma de poliuretano	40	22.2 ± 0.3	4.5 ± 0.2
Espuma de melamina	60	8.7 ± 0.0	14.6 ± 0.1

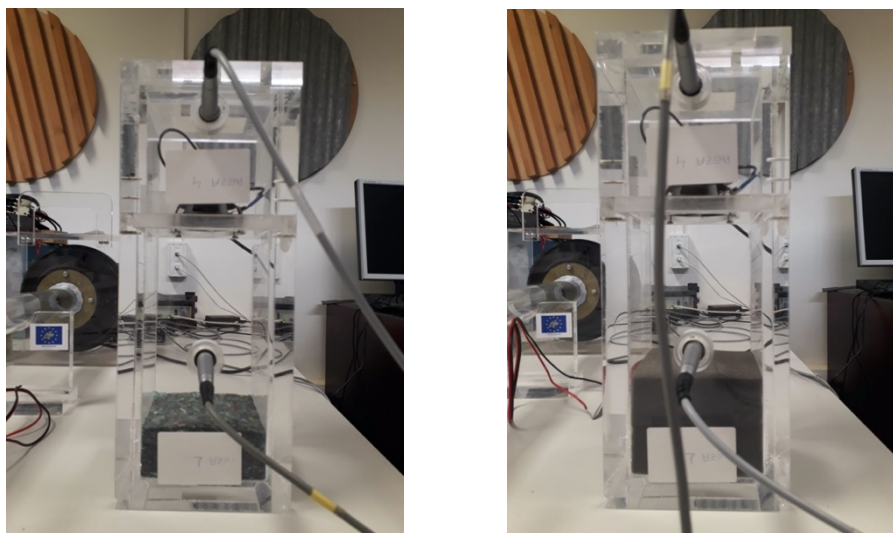


Figura 2 – Imágenes tomadas durante los ensayos

3.1 Melamina 6 cm

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la melamina de 4 cm de espesor. En la Figura 3 se representan los resultados del módulo de compresibilidad complejo en función de la porosidad y la frecuencia.

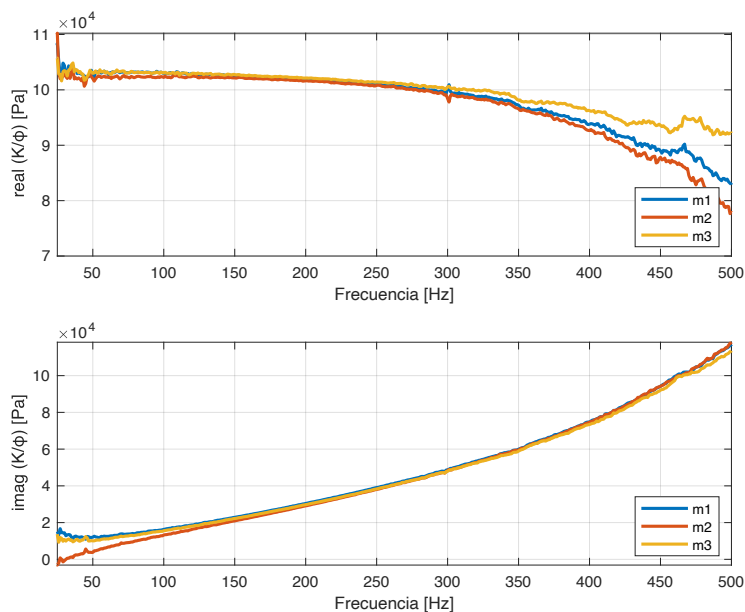


Figura 3 – Módulo de compresibilidad complejo, en función de la porosidad, de la melamina de 6 cm.

Si se comparan los resultados obtenidos con los del trabajo original para un material similar (ver Figura 4), se puede observar que, dentro del rango de validez de los resultados, éstos siguen las mismas tendencias. El material utilizado en el trabajo original es una melamina, MN, de 6.1 cm de espesor, resistividad al flujo de 9.4 kNs/m⁴ y una porosidad de 0.96, valores muy próximos a los del material utilizado en el presente trabajo.

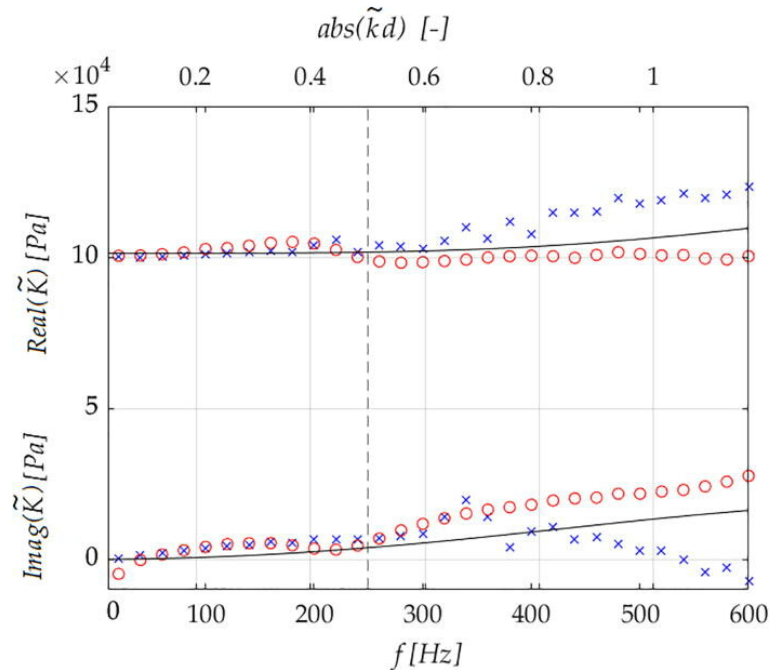


Figura 4 – Módulo de compresibilidad complejo para melamina, MN, presentados por Napolitano et al. [11].

3.2 Espuma de poliuretano 4 cm

Para el caso de la espuma de poliuretano de 4 cm, en la Figura 5 se representan los resultados del módulo de compresibilidad complejo en función de la porosidad y la frecuencia.

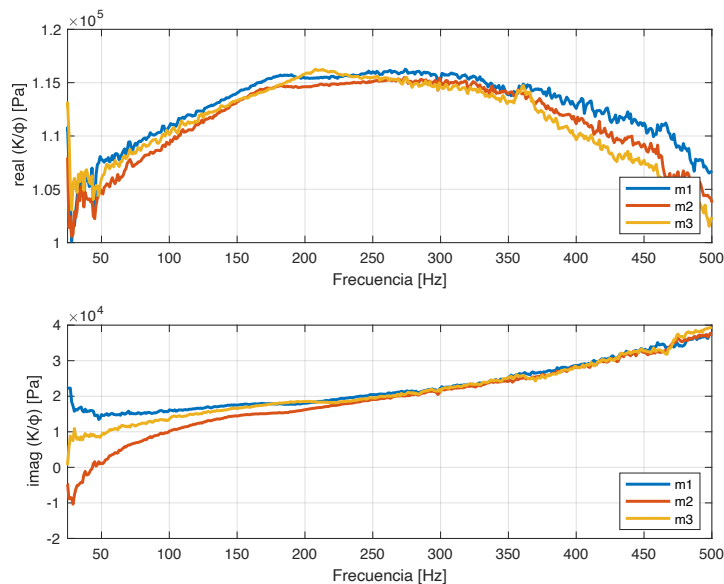


Figura 5 – Módulo de compresibilidad complejo, en función de la porosidad, de la espuma de poliuretano de 4 cm.

De forma análoga al caso anterior, se comparan los resultados obtenidos con el material MF del trabajo original (ver Figura 6). En este caso, se trata de una espuma de 4.8 cm con una resistividad al flujo de 2.7 kNs/m⁴ y un valor de porosidad de 0.99.

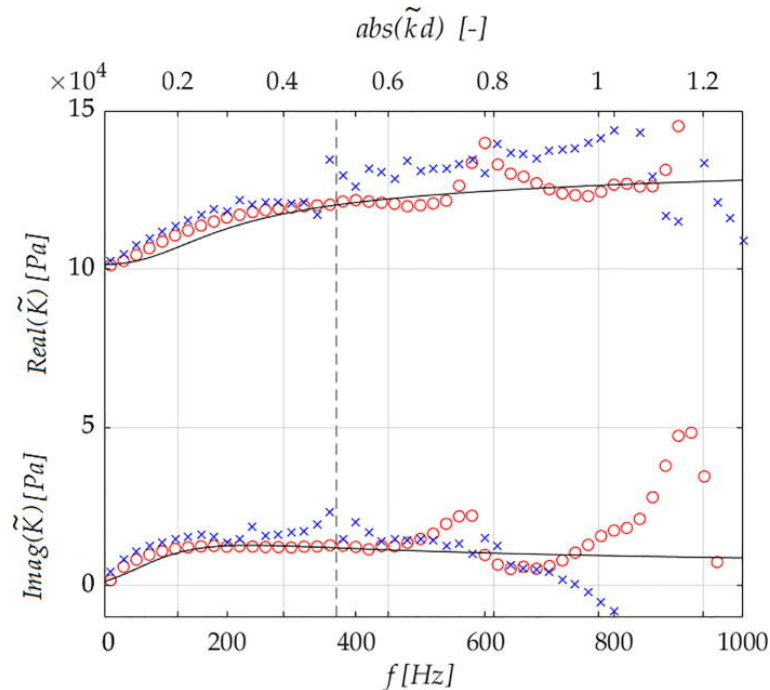


Figura 6 – Módulo de compresibilidad complejo para espuma, MF, presentados por Napolitano et al. [11].

4. CONCLUSIONES

A lo largo del presente trabajo se ha puesto en marcha el procedimiento planteado por Napolitano et al. en [11], para la determinación de forma indirecta del módulo de compresibilidad complejo. Se han propuesto algunas variaciones en el método de cálculo, con el objetivo de obtener el módulo de compresibilidad complejo a partir de las compliancias acústicas, obteniendo resultados satisfactorios, comparables a los obtenidos en el trabajo original.

Los resultados se han presentado en función de la porosidad de los materiales, puesto se no se ha llevado a cabo la medida de este parámetro, pero la comparativa, teniendo en cuenta los valores de porosidad de los materiales presentados en el trabajo original ha resultado satisfactoria.

En futuros trabajos se pretende completar el estudio con diferentes tipologías de materiales, con datos de porosidad de los mismos y con la estimación de los límites de validez de los resultados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Fondo Social Europeo y la Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad - Generalitat Valenciana, a través del programa ACIF-2020 (ACIF/2020/401).

REFERENCIAS

- [1] Zwikker, C.; Kosten, C. W. *Sound absorbing materials*. New York: Elsevier Pub. Co., 1949.
- [2] Johnson, D.; Koplik, J.; Dashen, R. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 176, 1987, pp. 379–402.
- [3] Champoux, Y.; Allard, J.-F. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous

- media, *Journal of Applied Physics*, vol. 70 (4), 1991, pp. 1975–1979.
- [4] Bonfiglio, P.; Pompoli, F. Inversion problems for determining physical parameters of porous materials: Overview and comparison between different methods, *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 99 (3), 2013, pp. 341–351.
- [5] McKinney, J. E.; Edelman, S.; Marvin, R. S. Apparatus for the Direct Determination of the Dynamic Bulk Modulus, *Journal of Applied Physics*, vol. 27 (5), 1956, pp. 425–430.
- [6] Burns, J.; Dubbelday, P. S.; Ting, R. Y. Dynamic bulk modulus of various elastomers, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 28 (7), 1990, pp. 1187–1205.
- [7] Holownia, B. P.; James, E. H. Determination of Dynamic Bulk Modulus of Elastomers Using Pressure Measurement, *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 66 (5), 1993, pp. 749–753.
- [8] Holownia, B. P. Experimental Measurement of Dynamic Bulk Modulus Using Holography, *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 58 (2), 1985, pp. 258–268.
- [9] McIntosh, J. D.; Zuroski, M. T.; Lambert, R. F. Standing wave apparatus for measuring fundamental properties of acoustic materials in air, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 88 (4), 1990, pp. 1929–1938.
- [10] Tarnow, V. Measurement of sound propagation in glass wool, *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 97 (4), 1995, pp. 2272–2281.
- [11] Napolitano, M.; Di Giulio, E.; Auriemma, F.; Romano, R. A.; Dragonetti, R. Low frequency acoustic method to measure the complex bulk modulus of porous materials, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 151 (3), 2022, pp. 1545–1556.
- [12] 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.
- [13] 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.