

# Caracterización acústica en tubo de impedancias de diseños QRD elaborados con fabricación aditiva

Aitor Martínez de la Cruz <sup>(1)</sup>, José A. Ballesteros <sup>(1)</sup>, Samuel Quintana Gómez <sup>(1)</sup>, Darío Herraiz Tirado <sup>(1)</sup>,  
Ángel Belenguer<sup>(1)</sup>.

aitor.martinezcruz@uclm.es, josea.ballesteros@uclm.es, samuel.quintana@uclm.es, dario.herraiztirado@uclm.es,  
angel.belenguer@uclm.es.

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Automática y Comunicaciones, Universidad de Castilla-La Mancha, Escuela Politécnica de Cuenca, Campus Universitario, 16071 Cuenca, Spain.

**Abstract**—There are many areas in which it is particularly important to perform a correct acoustic characterisation of materials. Some methods can be used to carry out this characterisation, such as the reverberation chamber or impedance tube method. With the rise of 3D printing techniques, custom geometries and structure designs with specific acoustic features can be achieved. In this article, the impedance tube method has been used to measure the absorption coefficient and transmission losses of a selection of 3D printed items, in order to characterise them acoustically. Using this method, the differences in acoustic behaviour between flat samples and samples designed using the *Quadratic Residue Diffusor* (QRD) technique can be determined. Additionally, the differences in absorption and transmission between 3D printed samples of different print densities have been compared.

## I. INTRODUCCIÓN

La caracterización acústica de materiales es un proceso esencial mediante el cual, obteniéndose parámetros como el coeficiente de absorción o las pérdidas de transmisión, se consigue conocer el comportamiento acústico de los materiales.

Existen varios métodos para llevar a cabo esta caracterización, como el método de la cámara reverberante [1] o el método del tubo de impedancias [2] [3], siendo este último uno de los métodos más utilizados. Sin embargo, la caracterización de materiales difusores mediante este tipo de método no es tan frecuente, ya que ha de realizarse en campo libre o en una cámara anecoica para poder discriminar entre la dirección de la onda incidente y el patrón de difusión de la energía difusa. En el tubo de impedancias las mediciones se realizan para incidencia normal. Este método suele ofrecer valores de coeficiente de absorción ligeramente superiores a otros métodos, y es útil para aplicaciones donde el sonido incide mayoritariamente en un ángulo perpendicular, como en la superficie de techos o paredes.

El uso de difusores es una de las técnicas comúnmente empleadas a la hora de obtener un campo difuso en un determinado recinto. Así, los difusores de Schröder, propuestos por el físico alemán del mismo nombre en [4] se basan en la disposición estratégica de distintas irregularidades sobre la superficie de un material mediante una serie de secuencias matemáticas previamente fijadas y fundamentadas en el lema de Gauss sobre reciprocidad cuadrática [5]. En función de la secuencia utilizada, se distinguen los difusores *Maximum Length Sequence* (MLS) [6], *Primitive-Root Diffusor* (PRD) [7] y *Quadratic Residue Diffusor* (QRD) [8].

Por otra parte, la fabricación aditiva o impresión 3D ofrece

nuevos enfoques en multitud de ámbitos, tanto por la geometría de las piezas como por los materiales utilizados. Valiéndonos de estas dos ventajas, en este trabajo se van a diseñar y fabricar diversas muestras QRD y muestras planas por medio de fabricación aditiva con un material relativamente inusual en acústica, como es el Acrilonitrilo Estireno Acrilato (ASA), un termoplástico con gran resistencia a la intemperie utilizado ampliamente en el campo de la automoción [9], presentando una densidad de  $1.07g/cm^3$  [10]. Tras esto, se va a realizar un estudio acústico mediante el método del tubo de impedancias de las muestras con el fin de comparar los resultados de absorción y transmisión obtenidos para ambos tipos de muestras.

## II. DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MUESTRAS

Para el diseño de las muestras se ha empleado un software tipo CAD por diversos motivos, como la facilidad para exportar formatos que sean compatibles con la impresora utilizada y la simplificación del diseño de estas estructuras tan complejas geoméricamente. Además, se ha automatizado su diseño para que, en caso de modificar los parámetros o dimensiones de la pieza, esta pueda actualizarse automáticamente sin necesidad de rediseñarla. La impresora utilizada es una Fortus 450mc de la marca Stratasys basada en tecnología de Modelado por Deposición Fundida (FDM).

### A. Diseño de las muestras

Para el estudio presentado en este artículo, se han fabricado dos tipos de muestras: muestras planas y muestras QRD. Las muestras planas se han fabricado para dos densidades distintas, mientras que las muestras QRD se han fabricado de igual densidad para los números primos  $p = 7$  y  $p = 11$ , cuya influencia veremos más adelante. A su vez, el acabado de las muestras QRD ha sido de dos tipos distintos: con acabado plano y con acabado en cuña. Esto se ha hecho a fin de aumentar la superficie expuesta a la onda incidente, y observar así si esto afecta a las propiedades acústicas de las muestras.

Las muestras planas consisten en un cilindro de diámetro  $d = 99.8 \text{ mm}$  (ligeramente inferior al del tubo de impedancias) ajustado lo máximo posible para que no haya fugas. Al utilizar fabricación 3D se puede ajustar con gran precisión este parámetro y reducir en gran medida las fugas.

Por otro lado, los difusores de Schröder, entre los que se encuentran los difusores QRD, están formados por una serie de irregularidades en la superficie del material que siguen una

secuencia matemática. Para el caso de los difusores QRD, la matriz con la altura de cada una de las celdas de la muestra viene determinada por la Ecuación 1 [11].

$$S_n = (m^2 + n^2) \text{ mod } p \quad (1)$$

Donde  $S_n$  determina el factor de altura de cada celda,  $p$  es un número primo escogido arbitrariamente (en este caso se han utilizado los primos  $p = 7$  y  $p = 11$ ) y  $m$  y  $n$  son los números enteros que van desde 0 hasta  $p - 1$ .

La anchura  $W$  y altura  $d_n$  de cada celda de las muestras QRD se obtienen mediante las Ecuaciones 2 y 3 respectivamente [6].

$$W = \frac{c}{2f_{max}} \quad (2)$$

$$d_n = \frac{s_n c}{2pf_0} \quad (3)$$

Donde  $c$  es la velocidad del sonido,  $p$  es un número primo (el mismo que en la Ecuación 1),  $f_0$  es la frecuencia de diseño y  $f_{max}$  es la frecuencia máxima para la cual se desea una difusión óptima.

En la Figura 1 se puede ver un esquema de una muestra QRD de diámetro  $d$  y altura  $b$ . A esta se le ha añadido una cuadrícula de celdas cuadradas de lado  $W$  y altura  $d_n$ . Para el otro tipo de muestras QRD, simplemente se ha añadido una cuña de altura  $W$  sobre cada una de las celdas individuales (esta altura es arbitraria). Cada cuña se ha orientado de forma arbitraria en una de las cuatro orientaciones posibles, de forma que no haya dos cuñas contiguas con la misma orientación, a fin de conseguir una mayor aleatoriedad sobre la geometría de la cara expuesta a la onda incidente. En las Figuras 2 A y 2 C se pueden apreciar en detalle las muestras QRD con cuñas.

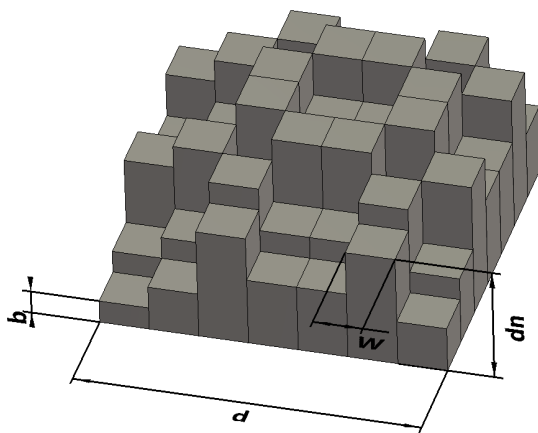


Fig. 1. Esquema de los elementos de la muestra QRD.

### B. Fabricación 3D de las muestras

En la Figura 2 se pueden ver todas las muestras fabricadas mediante impresión 3D. Las características de dichas muestras se pueden ver en la Tabla I. Para poder introducir la muestra QRD (geoméricamente cuadrada) en el tubo de medida (circular) se ha superpuesto el diseño del cuadrado QRD con un cilindro circular cuyo diámetro se ajusta al del tubo. Esto provoca que algunas de las celdas situadas en las

esquinas de la muestra cuadrada desaparezcan en la muestra circular. Como el objetivo de las muestras difusoras es que la superficie siga siendo irregular, el hecho de que haya que quitar las celdas de las esquinas se considera despreciable de cara a las medidas de las mismas.

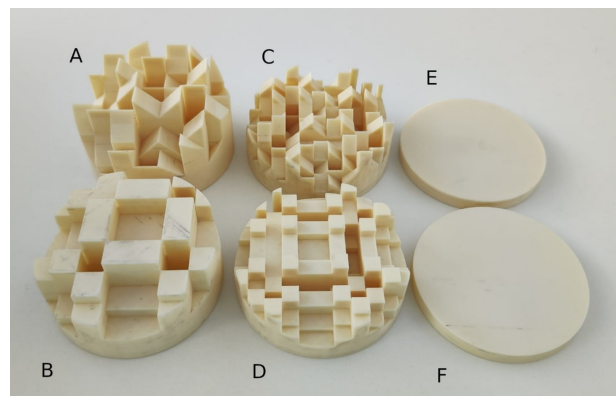


Fig. 2. A: QRD 7 con cuñas, B: QRD 7 plano, C: QRD 11 con cuñas, D: QRD 11 plano, E: muestra plana menos densa, F: muestra plana más densa

Tabla I  
RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS ELEMENTOS DE LA MUESTRA.

Tipo de muestra	W (mm)	b (mm)	d (mm)
Muestra plana (Figuras 2E y 2F)	-	10	99.82
Muestra p=7 (Figuras 2A y 2B)	14.27	5	99.82
Muestra p=11 (Figuras 2C y 2D)	9.09	5	99.82

Cabe destacar que el parámetro  $b$ , que en las muestras QRD hacía referencia a la altura de la base, en las muestras planas indica el espesor de la misma. Los dos tipos de muestras planas presentan los mismos valores de  $W$ ,  $b$  y  $d$ , diferenciándose únicamente en su densidad. En la Tabla II se pueden ver las características internas de las muestras fabricadas (a las cuales se las denomina como *infill*) y en la Figura 3 se puede ver la estructura interna de la muestra plana de menor densidad.

Cabe destacar que la diferencia entre *Sparse* y *Sparse - Double Dense* radica en las paredes internas de la malla. El tipo de mallado *Sparse* consiste en una malla de cuadrícula en la que hay una serie de paredes internas perpendiculares

Tabla II  
RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL INFILL DE LAS MUESTRAS.

Tipo de muestra	Ancho de la pared interior (mm)	Tipo de mallado interno	Ancho de la pared exterior (mm)
Muestra plana menor densidad (Figura 2E)	0.1270	Sparse (Ralo)	0.3048
Muestra plana mayor densidad (Figura 2F)	0.3048	Sparse - Double Dense	0.3048
Muestras QRD (Figuras 2A, 2B, 2C y 2D)	0.3048	Sparse - Double Dense	0.3048

entre sí (Figura 3). En el caso de la *Sparse – Double Dense* la distancia entre paredes paralelas es menor, por lo que, manteniendo la misma geometría interna, se consigue una densidad doble.

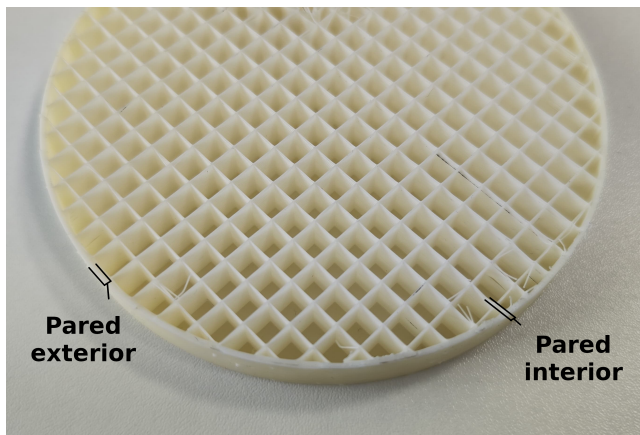


Fig. 3. Infill de la muestra de menor densidad.

### III. RESULTADOS

Para la realización de las medidas se ha empleado el método del tubo de impedancias, habiéndose utilizado el tubo más grande de la marca Brüel&Kjaer modelo 4206 para las medidas de absorción, y el modelo más grande del tubo 4206-T para las medidas de transmisión. Este modelo de tubo de impedancias tiene un rango frecuencial de trabajo entre 50 Hz y 1,6 kHz. Se ha empleado este modelo de tubo de impedancias debido a la mayor facilidad de fabricación de las muestras QRD mediante impresión 3D.

Para el tubo de transmisión se ha empleado el conocido como “Método de la dos cargas” [12]. En este método, se mide la presión sonora en cuatro posiciones fijas del tubo utilizando dos terminaciones lo más diferentes posibles, a fin de poder obtener la matriz de transferencia de la que se obtendrán las pérdidas de transmisión. En el estándar [2] no se especifica qué terminaciones hay que emplear, simplemente que han de ser lo más diferentes posibles. En este caso, se ha utilizado una terminación anecoica fabricada con un material poroso geotextil y una terminación reflectante (final metálico del propio tubo).

En las Figuras 4 y 6 se pueden observar los coeficientes de absorción de las muestras planas y QRD, mientras que en las Figuras 5 y 7 se pueden ver las pérdidas de transmisión de las muestras planas y QRD respectivamente. Para cada uno de los resultados se han efectuado tres medidas distintas de una misma muestra, extrayéndose y volviéndose a introducir en el tubo entre medida y medida para evitar posibles errores sistemáticos. Los resultados ofrecidos en cada una de las gráficas es el promedio de las tres medidas.

En relación con las muestras planas (Figuras 4 y 5), se aprecia una gran diferencia entre ellas, tanto para transmisión como para absorción. Para el coeficiente de absorción (Figura 4), los resultados de ambas muestras planas ascienden desde 0.01 a 50 Hz a 0.025 a 490 Hz. A partir de ahí, la muestra menos densa llega a alcanzar valores de absorción de 0.06, mientras que la muestra más densa llega a alcanzar un coeficiente de absorción de 0.16 a 1190 Hz. A partir de ahí,

desciende progresivamente hasta tener un valor de 0.01 a 1600 Hz. Ambas muestras presentan dos anomalías notables: en la primera se alcanza un valor de 0.05 a 550 Hz, y la segunda se da a 1316 Hz. Por debajo de 600 Hz no se aprecian diferencias notables entre ambas muestras. La muestra plana más densa presenta una resonancia a 1200 Hz, donde se llega a alcanzar un valor de absorción de 0.16.

En cuanto a las pérdidas de transmisión, si bien la muestra más densa presenta unas pérdidas de transmisión entre 50 dB y 75 dB para el rango frecuencial de 50 Hz a 430 Hz, no es posible determinar un comportamiento matemático determinado de las pérdidas de transmisión. A partir de esa frecuencia, las pérdidas de transmisión comienzan a descender progresivamente hasta los 35 dB, presentando una anomalía no muy notable a 1280 Hz. Por otro lado, la muestra plana menos densa presenta unas pérdidas de transmisión de 40 dB en baja frecuencia, y descende hasta los 8 dB a 524 Hz. A partir de ahí, las pérdidas comienzan a incrementarse, también progresivamente, alcanzando los 31 dB a 1600 Hz. Al contrario de la muestra más densa, esta presenta tres anomalías más evidentes localizadas a 1070 Hz, 1160 Hz y 1300 Hz, en las que se alcanzan valores de 30 dB de pérdidas de transmisión.

Para el coeficiente de absorción de las muestras QRD (Figura 6) se puede observar que existen diferencias notables entre ellas. Por un lado, se puede ver que las QRD para  $p = 7$  has presentado los mayores valores de absorción que para  $p = 11$ . Ambos llegan a ofrecer valores de absorción de 0.18 a 1300 Hz. Para frecuencias superiores a esta, la muestra para  $p = 7$  con cuñas ofrece valores de absorción entre 0.16 y 0.17, mientras que la absorción de la muestra QRD plana descende hasta 0.13. Cabe destacar que, para este caso, el QRD plano ofrece mayor absorción que el que presenta cuñas a partir de los 360 Hz. En cuanto a las muestras QRD para  $p = 11$ , las planas ofrecen mayor absorción que las muestras con cuñas para todo el rango frecuencial. Además, las cuatro medidas presentan dos anomalías claras a 840 Hz y a 1316 Hz.

En cuanto a las pérdidas de transmisión de las muestras QRD (Figura 7), se puede ver que todas siguen un patrón similar: los datos presentan una mayor dispersión hasta 400 Hz, y a partir de ahí se estabilizan entre los 50 dB y los 65 dB de pérdidas en función de la muestra, sin poderse determinar un comportamiento matemático determinado de las pérdidas de transmisión. Si bien todas las muestras presentan unos 15 dB de diferencia entre 400 Hz y 1600 Hz, la muestra QRD plana para  $p = 7$  presenta algo más de planitud en torno a los 50 dB de pérdidas de transmisión. Esto probablemente se deba a la mayor regularidad en las alturas de las distintas celdas de la muestra. También se puede apreciar cómo la muestra QRD para  $p = 11$  comienza a ofrecer valores más estables a una frecuencia superior que la muestra QRD para  $p = 7$ , debido a la diferencia de tamaño de las celdas en las muestras. Este efecto es casi inapreciable en las muestras con terminación en cuña, debido a la mayor complejidad de la geometría que presentan.

### IV. CONCLUSIONES

En primer lugar, se puede afirmar que la densidad de las muestras juega un papel fundamental en el comportamiento acústico de los materiales. Conforme aumenta la densidad

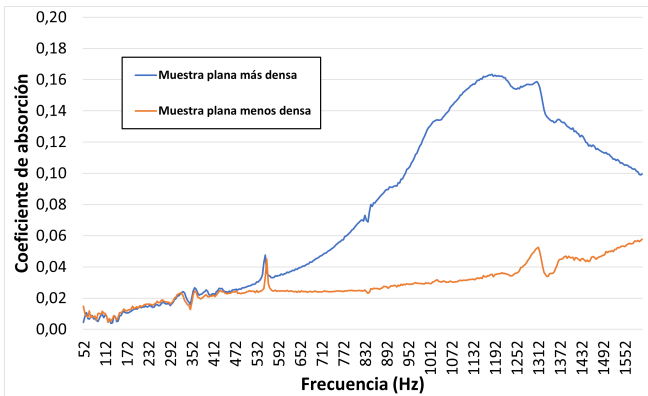


Fig. 4. Coeficiente de absorción de las muestras planas.

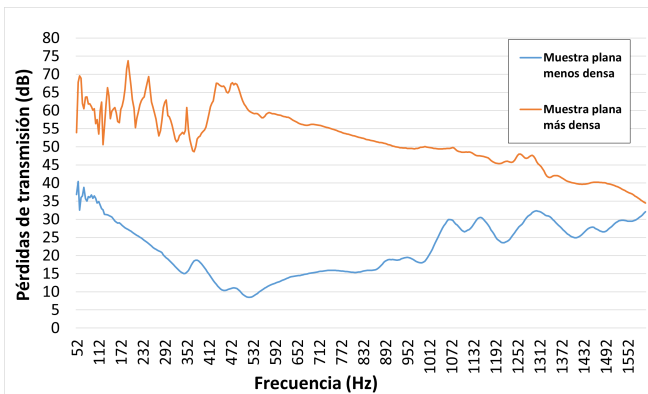


Fig. 5. Pérdidas de transmisión de las muestras planas.

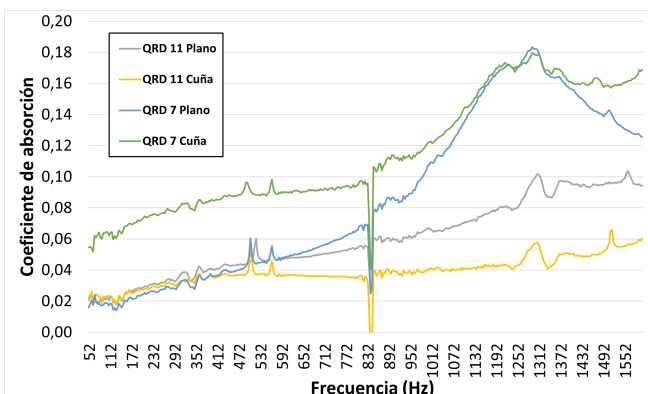


Fig. 6. Coeficiente de absorción de las muestras QRD.

de las muestras, se aumenta su coeficiente de absorción, especialmente a medias y altas frecuencias; además, también aumentan sus pérdidas de transmisión, debido a su mayor densidad y rigidez.

En segundo lugar, se ha podido observar que las muestras QRD para  $p = 7$  presentan un coeficiente de absorción superior al de las muestras QRD para  $p = 11$  en todo el rango frecuencial. Esto podría deberse a la diferencia en las proporciones de cada celda.

Por último, se ha podido observar que es más determinante el tamaño de las celdas en las muestras QRD ( $p = 7$  o  $p = 11$ ) que la terminación de las mismas (planas o cuñas). Esto se aprecia especialmente para el coeficiente de absorción, ya que, para  $p = 7$ , las muestras terminadas en cuñas

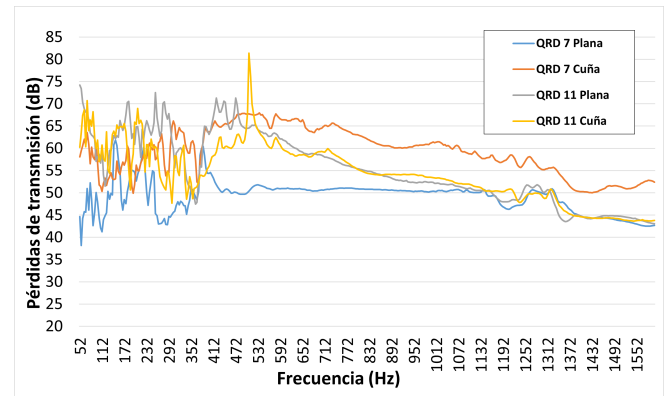


Fig. 7. Pérdidas de transmisión de las muestras QRD.

consiguen mejores prestaciones de absorción en todo el rango frecuencial, especialmente en baja frecuencia. Sin embargo, para  $p = 11$ , ocurre lo contrario, presentando mayores valores de absorción las muestras QRD planas.

Las muestras QRD impresas en 3D ofrecen una solución versátil y eficaz para una amplia gama de aplicaciones donde la calidad y control del sonido son críticos. La capacidad de personalizar y fabricar rápidamente estos difusores mediante impresión 3D abre nuevas posibilidades para la innovación en el diseño de estructuras y materiales.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación SBPLY/21/180501/000029, financiado por la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha-Consejería de Educación, Cultura y Deportes y por FEDER, UE. Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al Fondo Social Europeo Plus (FSE+).

#### REFERENCIAS

- [1] UNE-EN ISO 354:2004 - Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.
- [2] ASTM E2611-19 - Standard Test Method for Normal Incidence Determination of Porous Material Acoustical Properties Based on the Transfer Matrix Method
- [3] UNE-EN ISO 10534-2:2002 - Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia.
- [4] M. R. Schroeder, "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: More lateral sound difusión," J. Acoustical Society of America, vol. 65, no. 4, 1979.
- [5] C. F. Gauss, Untersuchungen uber höhere Arithmetik, Nueva York, 1965, 2.ª ed.
- [6] Lili Pan and Yuezhe Zhao, "An experimental investigation into the scattering properties of maximum length sequence diffusers and quadratic residue diffusers," Applied Acoustics, vol. 185, no. 1, 2022.
- [7] Monazzam et al., "Performance of Environmental T-shape Noise Barriers Covered with Primitive Root Diffusers," Archives of Acoustics, vol. 35, no. 4, 2010.
- [8] Fujiwara, K., "A Study on the Sound Absorption of a Quadratic-Residue Type Diffuser," ACUSTICA, vol. 81, no. 4, 1995.
- [9] Briceño-Martínez et al., "Tecnologías de impresión 3D: evaluaciones de FDM y Polyjet en la fabricación de autopartes de automóviles," Enfoque UTE, vol. 10, no. 3, 2019.
- [10] Stratasys - Industrial 3D Printing Manufacturers. ASA - Material Data Sheet FDM [Online]. Disponible: <https://support.stratasys.com/es/materials/fdm/asa>
- [11] P. Bongiovanni, M. Cascino and M. Sanso, "Análisis y diseño de difusores acústicos," Cátedra Fundamentos de Acústica y Electroacústica, 2011
- [12] X. Hua and D. W. Herrin, "Practical Considerations when using the Two-Load Method to Determine the Transmission Loss of Mufflers and Silencers," SAE International, vol. 6, no. 2, 2013.