

EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN SONORA PROPORCIONADA POR MATERIALES CON ALTA PERMEABILIDAD ACÚSTICA

PACS:43.15.+s, 43.50.Gf, 43.55.Ti

Galiana Nieves, Jaime*¹; Del Rey, Romina²; Alba, Jesús²; Ramírez-Solana, David³; Redondo, Javier⁴

¹Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022, Valencia, España,
[*jaiganie@doctor.upv.es](mailto:jaiganie@doctor.upv.es)

²Centro de Tecnologías Físicas, Universitat Politècnica de València, 46730, Grao de Gandía, España

³Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'informazione, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125, Bari, Italia

⁴Universitat Politècnica de València, Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Paranimf 1, 46730, Grao de Gandía, Valencia, España

Palabras Clave: nivel de reducción sonora, cristales de sonido, FDTD, campo difuso, normas ISO

ABSTRACT.

The measurement of the acoustic characteristics of sound barriers is defined by a number of standards. In particular, the insulation of sound barriers is regulated by EN 1793-6:2021 for *in-situ* measurements and EN 1793-2:2018 for laboratory measurements. The latter is used for obtaining the global sound insulation rating index, DL_R . This parameter is obtained from the values of the sound reduction index, R , which measurement method in transmission chamber is described in the standard ISO 10140-2:2021. This method is suitable for obtaining the acoustic reduction provided by a noise barrier when said reduction is relatively high throughout the frequency range studied.

The development of metamaterials, such as sonic crystals sound barriers, has highlighted some of the limitations of this method. One of the most relevant characteristics of these screens is the high sound permeability at certain frequencies.

With the standardised method, in cases where the acoustic reduction is exceptionally low, there is a tendency to overestimate the values obtained, which makes it difficult to correctly assess the insulation provided by these barriers.

In this study we suggest a formulation for obtaining the sound reduction index to overcome these limitations and improve the accuracy in the study of materials with a high transmission coefficient, in addition to studying the validity of this proposal by means of simulations with the finite difference method (FDTD) and experimental measurements in transmission chamber.

RESUMEN.

La medición de las características acústicas de pantallas de sonido está estandarizada mediante una serie de normativas. En particular, el aislamiento de las barreras acústicas viene regulado por las normas EN 1793-6:2021, para mediciones *in situ*, y EN 1793-2:2018 para medidas en laboratorio. A partir de esta última se obtiene el índice de evaluación del aislamiento acústico de pantallas, DL_R . Este parámetro se obtiene haciendo uso de otra normativa: la ISO 10140-2:2021, en la que se describe la medición del índice de reducción sonora, R , en cámara de transmisión. Este método es adecuado para medir el aislamiento acústico proporcionado por una pantalla cuando dicho aislamiento es relativamente alto en todo el rango de frecuencias, ya que se desprecia la contribución del sonido que se transmite del recinto receptor al recinto emisor.

El desarrollo de metamateriales, como las barreras basadas en cristales de sonido, han puesto en evidencia algunas de las limitaciones de dicho método, ya que dichas barreras no proporcionan aislamiento acústico en amplios rangos frecuenciales. La aplicación de dicho estándar de medida en cristales de sonido produce una sobreestimación del aislamiento acústico en los rangos frecuenciales en los que el cristal es permeable al sonido.

En el presente trabajo se propone una formulación que reduzca la citada sobreestimación y mejore la precisión en el estudio de materiales con un bajo aislamiento acústico. La propuesta se validará mediante simulaciones con el método de las diferencias finitas en dominio temporal (FDTD) así como mediciones experimentales en cámara de transmisión.

1. INTRODUCCIÓN

El comportamiento de una barrera de sonido viene definido por sus características acústicas intrínsecas, es decir, aislamiento y absorción sonora. Tanto el aislamiento como la absorción se deben medir siguiendo protocolos establecidos por las normas ISO. En particular, la norma EN 1793-2:2018 [1] describe la obtención del índice global de aislamiento acústico, utilizado para evaluar el comportamiento de las pantallas acústicas. Dicho valor global se obtiene a partir del índice de reducción acústica, R , medido en cámara de transmisión.

El método para la medición del índice de reducción acústica, R , viene recogido en la norma ISO 10140-2:2021 [2], que define dicho parámetro como:

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

donde τ es el coeficiente de transmisión proporcionado por la barrera, o lo que es lo mismo: el cociente entre la energía que atraviesa la barrera y la energía incidente.

Aplicando el modelo de campo difuso, y en particular la teoría de recintos acoplados, el índice de reducción sonora se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \frac{S}{A} \quad (2)$$

donde L_1 es el nivel de presión sonora en el recinto emisor, L_2 es el nivel de presión sonora en el recinto receptor, S es la superficie del elemento separador bajo estudio y A es la superficie de absorción acústica equivalente en el recinto receptor.

Dicha expresión sobreestima el aislamiento acústico cuando este es muy bajo. En pantallas convencionales los aislamientos suelen ser suficientemente altos como para que esto no ocurra. Por el contrario, en pantallas basadas en cristales de sonido [3] existen rangos frecuenciales con aislamientos próximos a 0 dB. Por ello, en el presente estudio, se propone una modificación de la ecuación para obtener el índice de reducción sonora que resulte válida también para aislamientos bajos.

2. OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE REDUCCIÓN SONORA

2.1 Normativa

El índice de reducción sonora (R) definido en la norma ISO 10140-2:2021 se obtiene a partir del modelo de campo difuso en recintos acoplados [4, 5]. En la figura 1 se muestra el esquema de dos recintos acoplados.

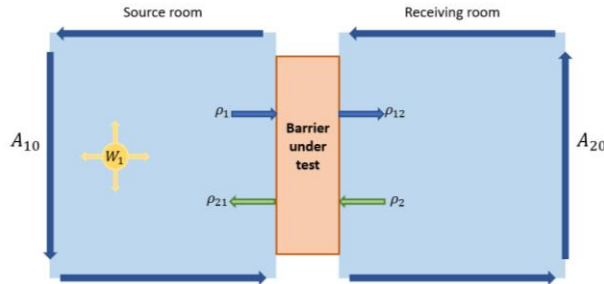


Figura 1 – Esquema de recintos acoplados.

Según el modelo de campo difuso aplicado a recintos acoplados la ecuación que rige la dinámica del campo acústico en el recinto receptor viene dada por

$$\frac{\partial \rho_{E2}}{\partial t} = \frac{1}{4} \rho_{E1} c \tau S - \frac{1}{4} \rho_{E2} c A_{20} - \frac{1}{4} \rho_{E2} c \tau S \quad (3)$$

donde:

- ρ_{E1} es la densidad de energía en el recinto emisor.
- ρ_{E2} es la densidad de energía en el recinto receptor.
- c es la velocidad de propagación del sonido en el aire.
- A_{20} es la superficie de absorción sonora equivalente en el recinto receptor.
- τ es el coeficiente de transmisión del elemento separador.
- S es la superficie del elemento separador.

En condiciones de estado estacionario, la expresión (3) es igual a cero, pudiendo así obtener el factor de acoplamiento, que describe la relación entre las densidades de energía de ambos recintos:

$$K_2 = \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} = \frac{\tau S}{A_{20} + \tau S} \quad (4)$$

Cuando las pérdidas por absorción en los cerramientos del recinto receptor, A_{20} , son muy superiores a la transmisión al recinto emisor se desprecia el coeficiente de transmisión en el denominador. De esta forma se obtiene una expresión sencilla, pero que provoca limitaciones cuando el coeficiente de transmisión es elevado:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} \cdot \frac{S}{A_{20}} \quad (5)$$

A partir de esta expresión se obtiene finalmente el índice de reducción sonora, R, tal y como está descrito en la norma ISO 10140-2:2021 (ecuación 2).

2.2 Nueva propuesta

Como se ha comentado previamente, el método existente sobreestima el resultado final cuando el coeficiente de transmisión es muy elevado. Si no se desprecia el segundo término del denominador de la ecuación (4), se obtiene la siguiente expresión para el coeficiente de transmisión:

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) \cdot \frac{S}{A_{20}} \quad (6)$$

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_{20}} \right) \quad (7)$$

resultando finalmente:

$$R = 10 \log_{10} \left(10^{(L_1 - L_2)/10} - 1 \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A_{20}} \right) \quad (8)$$

Esta expresión proporciona resultados muy similares a los obtenidos mediante la normativa, sobre todo cuando el índice de reducción sonora es elevado. Sin embargo, en los casos en los que éste es reducido, los resultados divergen cuanto menor sea la diferencia entre los niveles del recinto emisor y el receptor (véase figura 2).

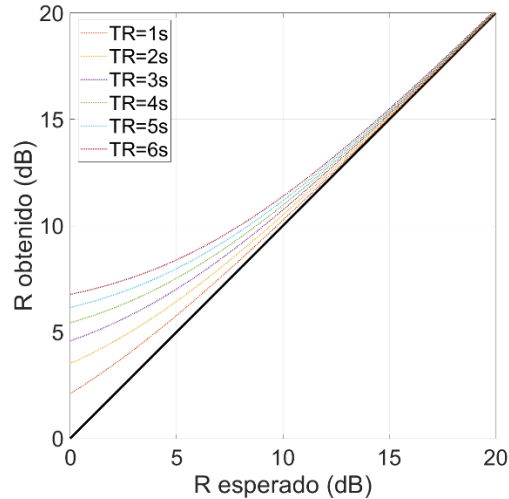


Figura 2 – Comparativa entre los niveles de reducción acústica esperados según la normativa dependiendo del tiempo de reverberación existente en una cámara de transmisión, con un recinto receptor de 50m³ de volumen.

4. MODELOS DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se han implementado mediante el método FDTD. Este método fue propuesto en 1966 por Yee [6] para el estudio de propagación de ondas electromagnéticas, siendo adaptado posteriormente en simulaciones acústicas [7]. Este método consiste en la discretización de las ecuaciones de onda acústica de presión y velocidad, permitiendo un estudio temporal de la propagación del sonido en un gran rango de frecuencias. Con esto se pueden conseguir análisis tanto en tiempo como en frecuencia que no se pueden obtener con otros métodos.

En primer lugar, mediante este método, se han realizado simulaciones de onda plana en tubo de impedancia con ángulo de incidencia variable para obtener el coeficiente de transmisión sonora en campo difuso proporcionado por las pantallas estudiadas.

Posteriormente se implementaron simulaciones en 2 y 3 dimensiones de diferentes casos de medidas experimentales en cámara de transmisión.

4.1. Onda plana

Para comprobar el aislamiento acústico objetivo de las pantallas estudiadas, se implementó un modelo de simulación mediante FDTD en tubo de impedancia con condiciones de contorno

periódicas basadas en el método del seno-coseno, utilizado con frecuencia en simulaciones electromagnéticas de estructuras periódicas [8]. De esta manera, es posible variar el ángulo de incidencia de la onda plana sobre el material aislante estudiado.

Con los valores del coeficiente de transmisión obtenidos para cada frecuencia y cada ángulo de incidencia aplicados, se realiza la integración angular para la obtención del coeficiente de transmisión en incidencia difusa [9]:

$$\bar{\tau}(f) = \frac{\int_0^{90^\circ} \tau(f, \theta) \sin \theta \cos \theta d\theta}{\int_0^{90^\circ} \sin \theta \cos \theta d\theta} \quad (9)$$

Donde:

- $\bar{\tau}(f)$ es el coeficiente de transmisión ponderado para cada frecuencia estudiada.
- θ es el ángulo de incidencia de una onda plana sobre la barrera.
- $\tau(f, \theta)$ es el coeficiente de transmisión obtenido para cada ángulo de incidencia y frecuencia.

Gracias a estas simulaciones podemos obtener unos coeficientes de transmisión objetivo con los que poder posteriormente validar las mediciones experimentales realizadas. Para ello se analizaron dos casos de barreras con propiedades aislantes reducidas utilizando este método.

En primer lugar, se estudió el aislamiento acústico proporcionado por pantallas homogéneas de bajo espesor y densidad mayor que la del aire. El coeficiente de transmisión tiene solución analítica dada por la siguiente expresión [10]:

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{Z_2}{Z_1} - \frac{Z_1}{Z_2} \right) \sin^2(k_2 \cos(\theta)L)} \quad (10)$$

donde:

- τ es el coeficiente de transmisión de una capa fina.
- Z_1 es la impedancia del aire.
- Z_2 es la impedancia del elemento separador.
- k_2 es el número de onda en el medio del elemento separador.
- θ es el ángulo de incidencia del sonido sobre la barrera.
- L es el grosor de la barrera.

Tras las simulaciones de onda plana aplicadas a capas finas, se repitió el proceso analizando estructuras periódicas basadas en cristales de sonido con distintos factores de llenado, obteniendo los niveles de reducción sonora que proporcionan este tipo de pantallas bajo condiciones de campo difuso.

4.2. Cámara de transmisión

Una vez obtenidos los resultados ideales de aislamiento acústico de los materiales bajo estudio, y haciendo uso de FDTD, se han implementado modelos de simulación de una cámara de transmisión en 2 y 3 dimensiones para estudiar la validez de la propuesta en condiciones experimentales. Las dimensiones de la cámara utilizada han sido las correspondientes a la cámara a escala instalada en la EPSG de Gandía [8], para obtener unos resultados comparables con los posteriormente obtenidos mediante mediciones.

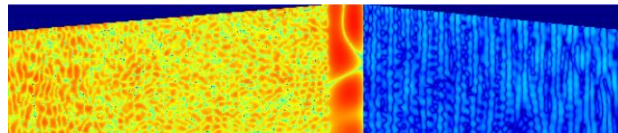


Figura 3 – Simulación en dos dimensiones de un elemento separador con densidad mayor que la del aire.

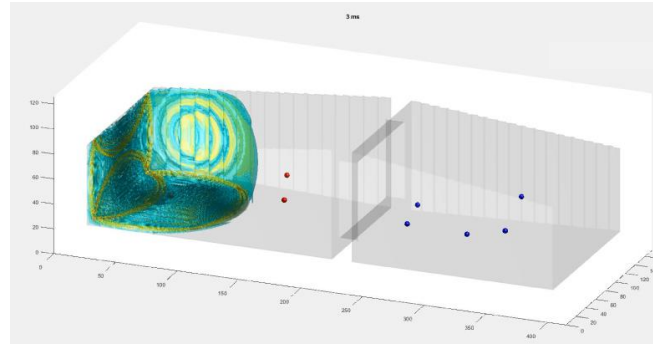


Figura 4 – Simulación en tres dimensiones de la cámara de transmisión utilizada

5. MEDICIONES EXPERIMENTALES

Las medidas se han llevado a cabo en los laboratorios del campus de Gandía de la EPSG UPV, haciendo uso de la cámara de transmisión a escala allí instalada. Se construyó una barrera basada en cristales de sonido con un factor de llenado del 75% y se siguió el procedimiento descrito en la norma ISO 10140-2:2021 para la obtención del índice de reducción sonora.

Se realizó el montaje de la pantalla en un marco de 0.47 m^2 y se llevaron a cabo mediciones para las distintas posiciones de micrófono en el interior de las cámaras, tanto de nivel de presión sonora como de tiempo de reverberación. Se repitieron un total de tres veces para comprobar la repetibilidad de los experimentos.

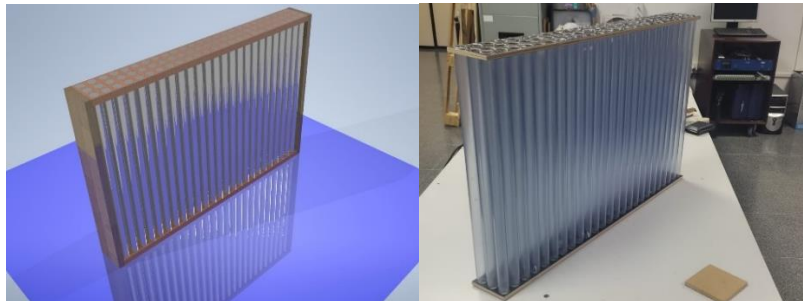


Figura 5 –Pantalla basada en cristales de sonido a escala. Modelo tridimensional y resultado final.



Figura 7 – Medidas realizadas en la cámara de transmisión a escala.

Una vez terminadas las mediciones, además del análisis espectral del índice de reducción sonora se realizó un promediado para comparar los resultados de manera uniforme, utilizando para ello una modificación de la expresión para la obtención del índice global de reducción sonora, definido en la norma EN 1793-2:2018. Dado que el estudio se ha realizado a escala 1:5 se desplazó el espectro de frecuencias por un factor cinco para aplicar la expresión del valor global de reducción acústica de 100 Hz a 5000 Hz.

$$DL_R^* = -10 \log_{10} \left| \frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i} 10^{-0.1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right| \text{ (dBA)} \quad (11)$$

Donde:

- DL_R^* es el valor global de reducción acústica.
- L_i son los valores de la red de ponderación A de 100 Hz a 5000 Hz en bandas de tercio de octava.
- R_i son los niveles de reducción sonora en las correspondientes bandas de tercio de octava.

Con esto y las simulaciones realizadas se puede obtener una apropiada comparativa de las expresiones estudiadas.

6. RESULTADOS

6.1. Simulaciones de condiciones de contorno periódicas

En primer lugar, se estudió el aislamiento acústico en campo difuso proporcionado por barreras compuestas por una capa fina de material más denso que el aire. Comparando los resultados teóricos del coeficiente de transmisión con los resultados de las simulaciones se puede deducir que el método es adecuado para la obtención del aislamiento acústico proporcionado por una pantalla en condiciones de campo difuso:

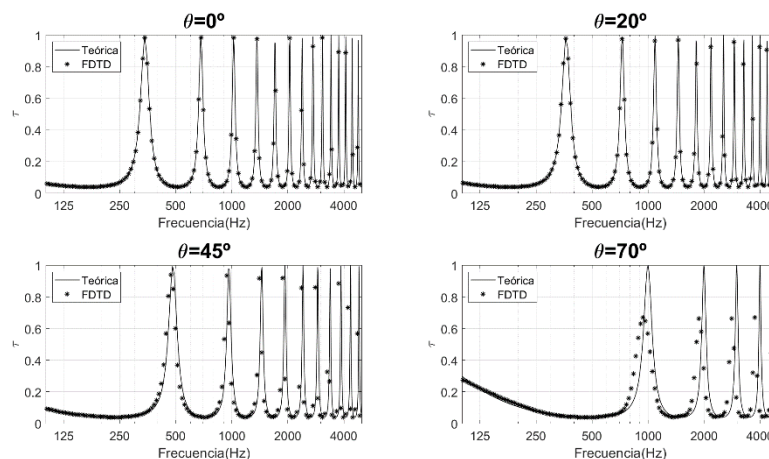


Figura 6 – Coeficiente de transmisión obtenido para distintos ángulos de incidencia mediante fórmula analítica y simulaciones con FDTD para una capa de 0,5m de grosor y densidad 10 veces mayor que la del aire.

Una vez comprobado que los resultados se ajustan a la expresión analítica se realiza el estudio para cristales de sonido con distintos factores de llenado para así obtener su aislamiento acústico real. Se estudiaron los casos en los que el radio del dispersor utilizado fuese el 25-50-75-90% de la separación entre los centros de dichos dispersores (parámetro de red), siendo esta separación la necesaria para que la frecuencia

La mayoría de los artículos que estudian el aislamiento acústico proporcionado por pantallas basadas en cristales de sonido se limitan a estudiar la reducción sonora producida en incidencia normal. Por ello, comparamos los resultados obtenidos mediante las simulaciones de onda plana con los resultados en incidencia normal (ver figura 7).

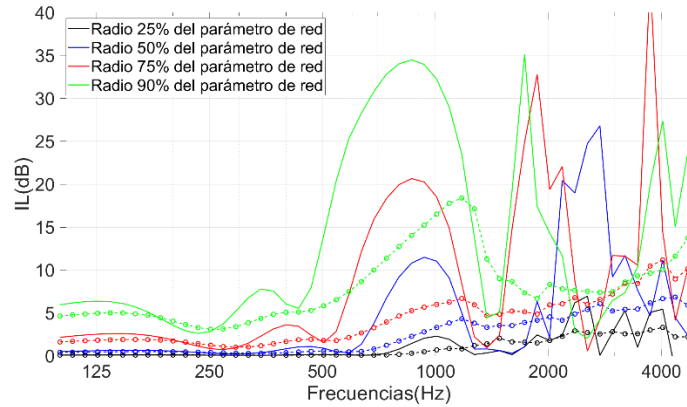


Figura 7 – Comparación de las pérdidas por inserción mediante simulaciones de onda plana entre los resultados para incidencia normal (líneas continuas) e incidencia en campo difuso (líneas de puntos)

Se observa que el aislamiento acústico en campo difuso es muy diferente al obtenido en incidencia normal, dando valores mucho más bajos. Sabiendo que en las pantallas basadas en cristales de sonido existen rangos frecuenciales sin aislamiento, como se observa en la figura (7), y que variando el ángulo de incidencia dichos rangos frecuenciales permeables al sonido pueden aumentar, se determina que dichas barreras son adecuadas para el estudio de la validez de la expresión propuesta en este artículo.

6.2. Simulaciones en cámara de transmisión

A partir de las simulaciones en cámara de transmisión se obtuvo el valor global de reducción acústica (D_{LR}^*) para los casos tanto de barreras finas de material denso como de pantallas basadas en cristales, comparándolos con los valores teóricos y obtenidos mediante simulaciones de onda plana.

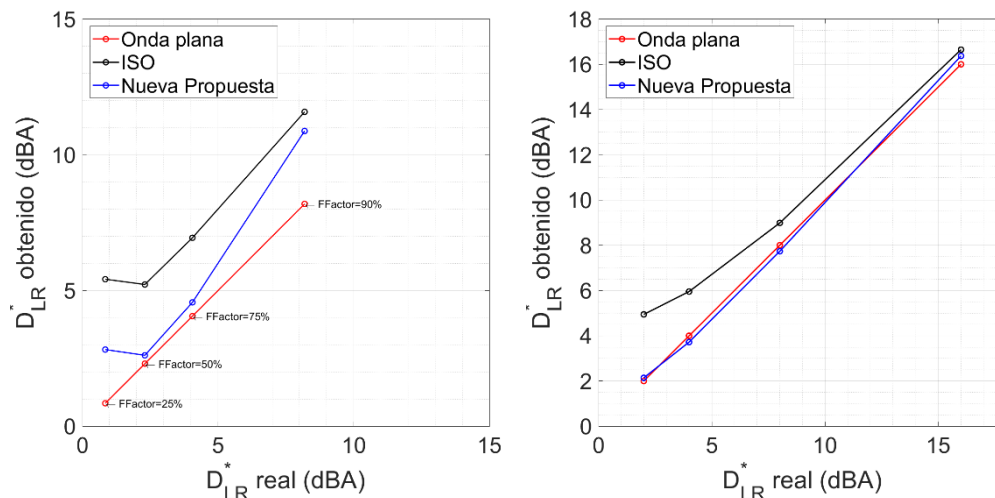


Figura 8 – Comparación del valor global de la reducción sonora obtenido mediante cada uno de los métodos para cristales de sonido con distintos factores de llenado (Izquierda) y para capas de material denso con el mismo espesor y distintas densidades (Derecha).

Se observa una mayor precisión de la expresión propuesta frente al método descrito en la norma ISO 10140-2:2021. En el caso de las simulaciones de capa fina en cámara de transmisión, los resultados de la reducción sonora proporcionada por la barrera coinciden con los valores teóricos del aislamiento acústico. En cuanto a las pantallas basadas en cristales de sonido se consigue una mejora sustancial de la precisión en la obtención del valor global de reducción sonora, principalmente en valores intermedios de factor de llenado.

6.3 Medidas experimentales

Las mediciones realizadas se procesaron con los métodos descritos en la normativa ISO 10140-2:2021, además de la expresión propuesta en este estudio. Se compararon con los resultados obtenidos en las simulaciones 3D para una pantalla de las mismas dimensiones y características, además de la simulación de condiciones periódicas para obtener el comportamiento ideal de la barrera en campo difuso, obteniendo el siguiente gráfico:

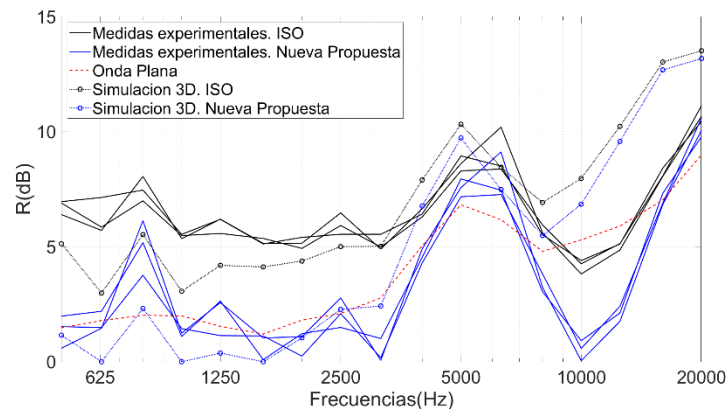


Figura 9 – Resultados de las mediciones en cámara de transmisión. Comparación entre mediciones, simulaciones en 3D y simulaciones de campo difuso con condiciones de contorno periódicas.

7. CONCLUSIONES

En este estudio se ha propuesto una nueva formulación de la expresión utilizada para la obtención del índice de reducción sonora. Su validez se ha estudiado a partir de simulaciones y medidas experimentales, que han devuelto resultados favorables que muestran una mayor precisión por parte de la formulación propuesta. Esto subsanaría las limitaciones de la normativa vigente a la hora de medir el aislamiento acústico proporcionado por pantallas con alta permeabilidad acústica.

En lo sucesivo, se estudiará la influencia de la disipación acústica proporcionada por las pantallas de sonido en la mejora de la precisión de la obtención del nivel de reducción acústica.

REFERENCIAS

- [1] EN, 1793-2:2018 *Road Traffic Noise reducing devices-Test method for determining the acoustic performance- Part 2: Intrinsic characteristics of airborne sound insulation under diffuse sound field conditions*, 2018
- [2] ISO, 10140-2:2021 *Acoustics-Laboratory measurement of sound insulation of building elements-Part 2: Measurement of airborne sound insulation*, 2021
- [3] Sanchez-Perez, J.V.; Rubio, C; Martinez-Sala, R; Sanchez-Grandia, R; Gomez, V, *Acoustic barriers based on periodic arrays of Scatterers*, Applied Physics Letters, vol. 81, no. 27, pp. 5240–5242, 2002.
- [4] Hopkins, C, *Sound insulation*. Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2007, 622 p.
- [5] Crocker, M.J.; Price, A.J.; *Sound Transmission Using Statistical Energy Analysis*, J. Sound Vib, 9(3), 469-486, 1969
- [6] Yee, K.S., *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*, IEEE Transactions on Antennas Propag., 14, 302-7, 1966
- [7] Redondo, J; Picó, R; Roig, B; Avis, M.R., *Time domain simulation of sound diffusers using finite-difference schemes*. Acta Acustica united with Acustica, 93(4), 611-622, 2007
- [8] Taflove, A; C.Hagne, S; *Computational electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method*, Artech House, 3rd edition, 2005
- [9] Kang, H; Ih, J; Kim, J; Kim, H, *Prediction of sound transmission loss through multi-layered panels by using Gaussian distribution of directional incident energy*, The Journal of the Acoustical Society of America, 107(3), 2000
- [10] Kinsler, L.E.; Frey, A.R.; Coppens, A.B.; Sanders, J.V.; *Fundamentals of acoustics*, Wiley-VCH, 1999
- [11] Alba, J; Del Rey, R; Torres, J.V.; Bertó, L; Hervás, C, *Cámara de transmisión acústica a escala para el estudio de pantallas acústicas*, Congreso Ibero-Americano de Acústica, 2012