

SOBRE LA MEDICIÓN DEL AISLAMIENTO DE BARRERAS ACÚSTICAS BASADAS EN CRISTALES DE SONIDO.

Galiana N. Jaime¹, Redondo P. Francisco Javier¹, del Rey T. Romina¹, Godinho. Luís²

¹Universitat Politècnica de València, Escuela Politécnica Superior de Gandía

jaiganie@epsg.upv.es, fredondo@fis.upv.es, roderey@fis.upv.es

²ISISE, Departamento de Eng. Civil, Universidade de Coimbra, Portugal

lgodinho@dec.uc.pt

Resumen

Las barreras acústicas suelen clasificarse atendiendo a sus características acústicas intrínsecas, fundamentalmente por el aislamiento que proporcionan. El método de medida está estandarizado en la norma UNE-EN ISO 10140-2:2010, en la que se define el “Índice de reducción sonora” (R). Este método supone que el elemento estudiado produce un aislamiento más o menos elevado en todo el rango de frecuencias sobre el que se trabaja.

Sin embargo, en los últimos años se han introducido barreras acústicas basadas en cristales de sonido que tienen la peculiaridad de que para ciertas frecuencias no proporcionan aislamiento acústico alguno. Nuestro objetivo es adaptar el método de medida para que, en el caso de niveles nulos de aislamiento, devuelva valores del índice de reducción sonora “R” coherentes con la realidad.

En este trabajo se propondrá una variación del método actual y se comprobará su correcto funcionamiento a partir de simulaciones y su posterior procesado.

Palabras clave: Cristal de Sonido, Reducción Acústica, FDTD, Barrera Acústica.

Abstract

Acoustic barriers are often classified according to their intrinsic characteristics. Mainly the acoustic reduction they produce. The method used for measuring this parameter is described in the UNE-EN ISO 10140-2:2010 standard, in which the “acoustic reduction index” (R) is defined. This method presumes that the element under study produces acoustic reduction in all the hearable frequencies analyzed.

However, acoustic barriers based on sonic crystals have been put under study in recent years. These barriers’s main characteristic is that, for some frequencies, they do not produce any acoustic isolation. Our goal is to adapt the measurement method for those cases in which a near-zero acoustic reduction is found, and so, obtaining a coherent “R” level.

In this project we will propose a modification of the current method and test its proper performance through computerized simulations and its subsequent processing.

Keywords: Sonic Crystal, Acoustic Reduction, FDTD, Acoustic Barrier.

PACS no. 43.50, 43.15

1 Introducción

Para la caracterización del comportomamiento de pantallas acústicas han de tenerse en cuenta varios factores, cuyo método de obtención está normalizado por distintos estándares y normativas.

Uno de los parámetros más importantes para el estudio de barreras es el índice de reducción acústica R , que se expresa en decibelios y define el porcentaje de energía acústica que se transmite a través de un medio aislante.

La expresión utilizada para la obtención de este parámetro viene definida en la normativa UNE-EN ISO 10140-2:2010[1]:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left(\frac{S}{A} \right) \quad (1)$$

Esta expresión relaciona la diferencia de niveles entre dos recintos contiguos separados por un elemento aislante. L_1 será el nivel de presión sonora en un recinto emisor (en dB), en el que situa una fuente acústica, L_2 es el nivel de presión sonora en el recinto receptor (en dB), S es la superficie del elemento separador en el hueco entre ambos recintos(en m^2) y A es el área total de absorción acústica equivalente del recinto receptor (en m^2).

El nivel devuelto por esta expresión será el nivel de reducción acústica producido por la barrera introducida.

Este método es apropiado en el caso de que se estudie una barrera rígida, que produce cierto aislamiento, en mayor o menor medida, en toda la banda de frecuencias audibles sobre las que se realice el estudio. Sin embargo, en los últimos años, se han venido desarrollando unos nuevos tipos de barreras basadas en estructuras cristalinas que actúan como medios acústicamente transparentes para ciertas frecuencias, produciendo aislamiento en las bandas en las que se desee dependiendo de su diseño.

Esto significa que para ciertas frecuencias, la diferencia entre los niveles del recinto emisor y el recinto receptor es muy pequeña, esperando un índice de reducción acústica cercano a los 0 dB. Sin embargo, debido al tercer factor de la expresión (1), que es dependiente del tiempo de reverberación de la sala en la que se realice el estudio y de la superficie de la barrera utilizada, solemos encontrarnos ante que, para niveles de aislamiento muy bajos, o incluso nulos, el índice de reducción sonora devuelto es superior a lo esperado, por lo que la caracterización de barreras acústicas basadas en cristales no resulta fiel a la realidad.

Por ello, el objetivo de este estudio es intentar obtener una expresión que aproxime de la misma forma el índice de reducción acústica, pero que devuelva niveles fiables cuando nos encontremos ante transmisiones muy elevadas.

2 Índice de reducción sonora y nueva propuesta.

2.1 Estudio analítico de la expresión del índice de reducción sonora.

El nivel de reducción sonora se define como:

$$R = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (2)$$

Donde τ es el coeficiente de transmisión a través de un medio, un valor entre 0 y 1 que indica el porcentaje de energía sonora que atraviesa un elemento separador. En el caso de que la transmisión sea total ($\tau = 1$) se nos devolvería un valor de reducción acústica de $R = 0$. Como hemos dicho previamente, esto no puede ocurrir en la expresión (1) tal y como está definida.

La forma de obtener y aislar el coeficiente de transmisión para definir el índice de reducción sonora viene de la relación entre recintos acoplados y el estudio del balance energético en estado estacionario en estos

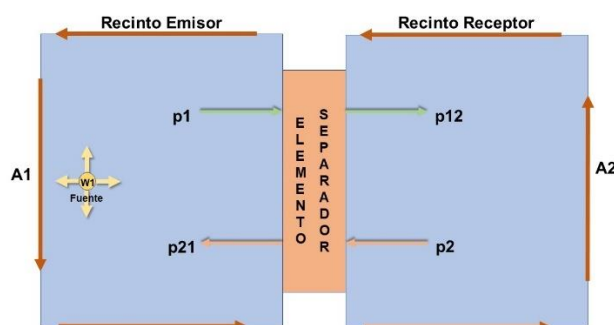


Figura 1 – Ejemplo de recintos acoplados

La expresión (1) se obtiene a partir del análisis del balance de energías una vez esta ha alcanzado el estado estacionario. Esto se define como:

Para el recinto emisor, en el que estará situado la fuente sonora:

$$W - \frac{1}{4} \rho_{E1} c \tau S - \frac{1}{4} \rho_{E1} c A_1 + \frac{1}{4} \rho_{E2} c \tau S = 0 \quad (3)$$

Donde ρ_{E1} y ρ_{E2} son las densidades de energía acústica del recinto emisor y receptor respectivamente, W es la potencia acústica generada por la fuente (en wattios), c es la velocidad del sonido (en m/s), S es la superficie del elemento separador (en m^2), A_1 es el área de absorción acústica equivalente de las paredes del recinto emisor (en m^2).

En el recinto receptor, la expresión resultante del balance energético sería:

$$\frac{1}{4} \rho_{E1} c \tau S - \frac{1}{4} \rho_{E2} c A_2 - \frac{1}{4} \rho_{E2} c \tau S = 0 \quad (4)$$

De esta fórmula podemos deducir un factor de acoplamiento k_2 (índice que define la relación de energía entre dos recintos acoplados) que resulta:

$$k_2 = \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} = \frac{\tau S}{\tau S + A_2} = \frac{\tau S}{A_{22}} \quad (5)$$

Y a partir de esta expresión, pasando a escala logarítmica, podemos obtener la fórmula (1) para la obtención del índice de reducción sonora.

2.2 Desarrollo matemático de una nueva propuesta.

Lo primero que hemos observado en el desarrollo anterior es que únicamente toma el coeficiente de transmisión como factor determinante a la hora de estudiar el comportamiento acústico del elemento separador. Sin embargo, sabemos que una pantalla acústica puede influir de distintas maneras en la energía transmitida, ya que se puede caracterizar por los índices de transmisión (energía que atraviesa el elemento), reflexión (la energía que, al encontrarse con el medio separador, se refleja de nuevo hacia el recinto emisor) y absorción o disipación (la energía que se pierde en forma de calor en el proceso de atravesar la barrera) [2]. También pueden producir difracción, pero al tratarse de un caso en el que la barrera se encuentra en un recinto cerrado, podemos obviar este fenómeno.

Realizamos entonces un desarrollo igual al del apartado anterior, sólo que añadiremos las pérdidas producidas por la disipación en el elemento separador:

En el caso del recinto emisor:

$$W - \frac{1}{4}\rho_{E1}c\tau S - \frac{1}{4}\rho_{E1}c\alpha_E S - \frac{1}{4}\rho_{E1}cA_1 + \frac{1}{4}\rho_{E2}c\tau S = 0 \quad (6)$$

Donde llamamos α_E al coeficiente de energía disipada en el medio aislante. En recinto receptor, la expresión pasaría a ser:

$$\frac{1}{4}\rho_{E1}c\tau S - \frac{1}{4}\rho_{E2}cA_2 - \frac{1}{4}\rho_{E2}c\tau S - \frac{1}{4}\rho_{E2}c\alpha_E S = 0 \quad (7)$$

A partir de aquí, desarrollamos nuevamente para obtener el factor de acoplamiento entre ambos recintos:

$$k_2 = \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} = \frac{\tau S}{\tau S + \alpha_E S + A_2} = \frac{\tau}{\tau + \alpha_E + \frac{A_2}{S}} \quad (8)$$

$$\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} = \frac{\tau + \alpha_E + \frac{A_2}{S}}{\tau} = 1 + \frac{\alpha_E + \frac{A_2}{S}}{\tau} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\tau} = \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\alpha_E + \frac{A_2}{S}} \quad (10)$$

Pasamos a escala logarítmica:

$$R = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) - 10 \log_{10} \left(\alpha_E + \frac{A_2}{S} \right) \quad (11)$$

Desarrollamos el primer término de la expresión, aislando las densidades de energía para poder obtener la diferencia de niveles de presión sonora en decibelios:

$$10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} \left(1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) \right) \quad (12)$$

$$10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} \left(1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} \right) + 10 \log_{10} \left(1 - \frac{\rho_{E2}}{\rho_{E1}} \right) \quad (13)$$

$$10 \log_{10} \left(\frac{\rho_{E1}}{\rho_{E2}} - 1 \right) = L_1 - L_2 + 10 \log_{10} \left(1 - 10^{-\frac{(L_1 - L_2)}{10}} \right) \quad (14)$$

Simplificaremos el término obtenido como:

$$10 \log_{10} \left(1 - 10^{-\frac{(L_1 - L_2)}{10}} \right) = C \quad (15)$$

Con lo que, finalmente, obtendremos una expresión para la obtención del índice de reducción acústica de la forma:

$$R = L_1 - L_2 + C - 10 \log_{10} \left(\frac{A_2}{S} + \alpha_E \right) \quad (16)$$

Siendo:

- R el índice de reducción acústica, en decibelios.
- L_1 el nivel de presión sonora en el recinto emisor, en decibelios.
- L_2 el nivel de presión sonora en el recinto receptor, en decibelios.
- C un factor de corrección dependiente de los niveles de presión de ambos recintos, definido en la fórmula (15).
- A_2 el área de absorción equivalente de las paredes del recinto receptor.
- S la superficie total del elemento separador bajo estudio.
- α_E es el coeficiente de la energía disipada en el elemento separador. Será un valor entre 0 y 1.

El factor C actúa como un factor de corrección que tiende a niveles negativos cuando la diferencia entre el nivel en el emisor y en el receptor es baja, propiciando así la obtención de niveles de reducción sonora cercanos a los 0 dB cuando los niveles en los recintos sean muy similares en ciertas frecuencias.

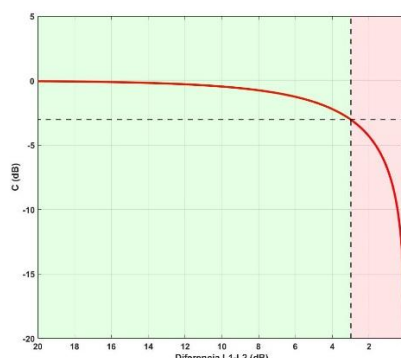


Figura 2-Valor del factor C dependiente de la diferencia de niveles L1-L2

3 Simulaciones mediante FDTD y comparación de ambos métodos.

El método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo, definido por Yee en 1966 [3], es uno de los más utilizados en los estudios de propagación de ondas, tanto a nivel electromagnético como acústico.

Se basa en un desarrollo diferencial de la ecuación de propagación de las ondas acústicas, dependientes de la presión y la velocidad de partículas.

En este proyecto se ha implementado un dominio equivalente a una cámara de transmisión en 2 Dimensiones, y se han realizado una serie de experiencias para comprobar la viabilidad de la expresión propuesta para los casos en los que la descrita en la norma UNE-EN ISO 10140-2:2010 [1] nos devuelva valores de aislamiento que no se correspondan con lo esperado.

3.1 Barreras basadas en cristales.

Nos centramos en el funcionamiento para barreras acústicas basadas en estructuras cristalinas. Estos elementos se basan en las leyes de Bragg de la difracción[4], que describen cómo una disposición en forma de red periódica de elementos difusores puede impedir la propagación de ondas a frecuencias específicas a través de un medio.

El diseño de estas barreras se realiza a partir de la frecuencia a la que se desee que se reduzca la transmisión de energía (*banda prohibida* o *band gap*). La distancia entre elementos difusores se denominará *parámetro de red* y el tamaño de los mismos será el *factor de llenado*. El ancho de la banda de la banda prohibida que se busque será mayor cuanto más alto sea el factor de llenado[5].

Se define el parámetro de red como:

$$a = \frac{c}{2f} \quad (17)$$

Siendo a el parámetro de red(en metros), c la velocidad del sonido (en m/s) y f la frecuencia en la que deseamos que se encuentre la primera banda prohibida de energía.

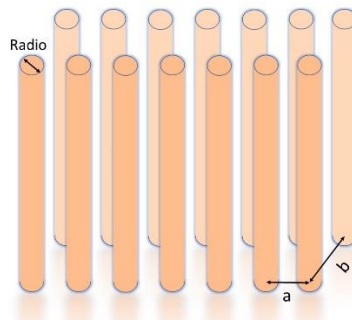


Figura 3-Esquema de una barrera cristalina

3.2 Tiempo de reverberación y obtención de absorciones

Para el cálculo del índice de reducción acústica es necesario conocer el área de absorción equivalente del recinto receptor. Para obtener este valor en los casos que se han estudiado, se ha realizado una simulación del tiempo de reverberación en 2 dimensiones, a partir del cual podemos obtener la longitud de absorción equivalente, que será el equivalente bidimensional del área utilizada en las expresiones descritas.

Para obtener el tiempo de reverberación simulado de un recinto en 2 dimensiones se utiliza una expresión desarrollada a partir de la fórmula de Sabine, utilizada en la obtención del tiempo de reverberación según la norma UNE-EN ISO 354:2004[6].

$$t_{R2D} = \frac{\pi \cdot 0,162S}{4 \cdot L\alpha} \quad (18)$$

Donde t_{R2D} es el tiempo de reverberación en dos dimensiones, S es la superficie total del recinto bajo estudio, L es el perímetro del recinto y α es el coeficiente de absorción medio de las paredes del recinto[7].

El área de absorción equivalente será entonces sustituida en el caso bidimensional por el producto del perímetro del recinto y la absorción media de la sala, obtenida a partir del tiempo de reverberación.

3.2.1 Ejemplo de cálculo de absorción de las paredes del recinto receptor.

Se ha realizado una simulación de una sala con un perímetro total de $L = 16,52 \text{ m}$ y una superficie de $S = 16,5 \text{ m}^2$. Se le aplica al modelo unas condiciones de contorno que produzcan cierto nivel de disipación y se realiza la simulación para obtener exactamente la absorción producida por las paredes del recinto mediante la expresión 18.

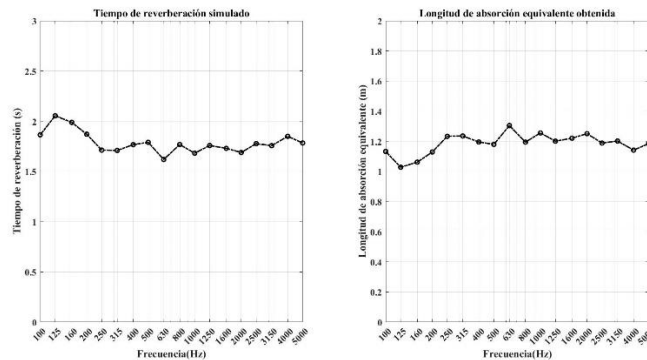


Figura 4-Tiempo de reverberación y longitud de absorción equivalente

3.3 Estudio de una barrera basada en cristales.

Se ha realizado el diseño de una barrera acústica compuesta por 3 columnas de cilindros y hemos decidido que su band gap se encuentre situada en la banda de los 1000 Hz, por lo tanto sus elementos reflectantes estarán separados una distancia $a = 0,172 \text{ m}$ según la ecuación 17.

El radio de estos cilindros se determinará a partir del cálculo de factor de llenado, que tomaremos como un 55% del área total formada entre los centros de cuatro cilindros. Queda entonces unas dimensiones del cilindro con la forma:

$$r = \sqrt{\frac{f_{\text{llenado}} \cdot a^2}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,55 \cdot 0,172^2}{\pi}} = 0,072 \text{ m} \quad (19)$$

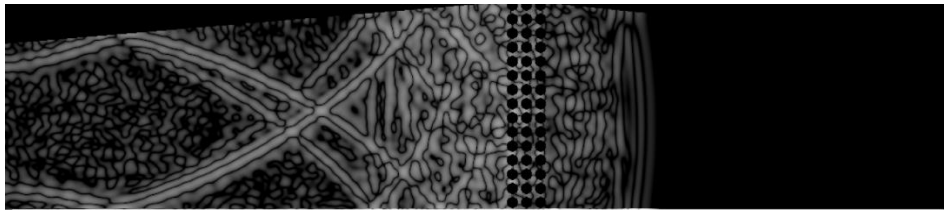


Figura 5-Visualización de la barrera y la simulación mediante FDTD en dos dimensiones

3.3.1 Absorción producida por la barrera.

Para calcular la energía que se transmite a través de la pantalla acústica, se ha realizado un estudio en el que, tras calcular el tiempo de reverberación del recinto receptor sellado (apartado 3.2.1) se compara sustituyendo el cerramiento que conecta el recinto emisor con el receptor y situando en su lugar la barrera bajo estudio.

Al otro lado del cerramiento se emplaza una PML (*Perfectly Matched Layer*) [8] para evitar cualquier tipo de reflexión y tomar la barrera como una pared más del recinto, cuya influencia a la absorción total de la sala será una combinación entre la energía transmitida a través de la pantalla y la disipación producida en el interior de la misma.

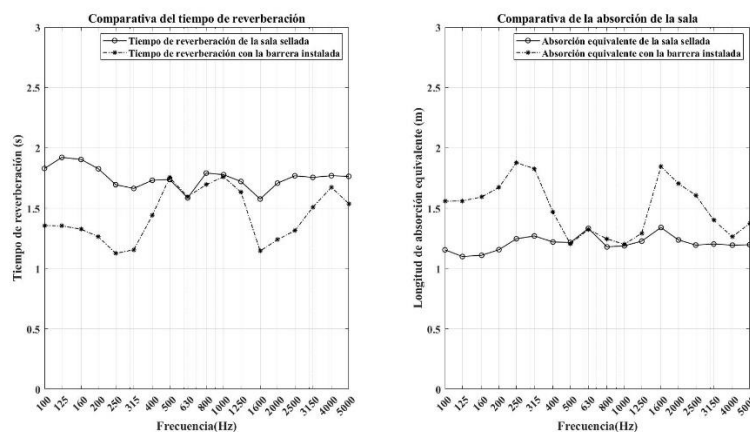


Figura 6-Tiempos de reverberación obtenidos con la sala cerrada y con la barrera

Podemos observar en estos resultados cómo la barrera permite una transmisión elevada de la mayoría de las frecuencias estudiadas, reduciendo notablemente el tiempo de reverberación al emplazarla como elemento separador. Sin embargo, observamos que, a 1000 Hz, la frecuencia a la que se ha diseñado el parámetro de red del cristal, la absorción producida no varía apenas con respecto al caso de la sala totalmente sellada, lo cuál indica que las pérdidas por transmisión en esa banda de frecuencias son muy pequeñas.

3.3.2 Obtención del índice de reducción acústica para la barrera basada en cristales.

Habiendo obtenido ya las longitudes de absorción equivalente del recinto receptor tanto cerrado como con una barrera cristalina como elemento separador, podemos calcular el índice de reducción acústica según las expresiones 1 y 16 y comparar los resultados.

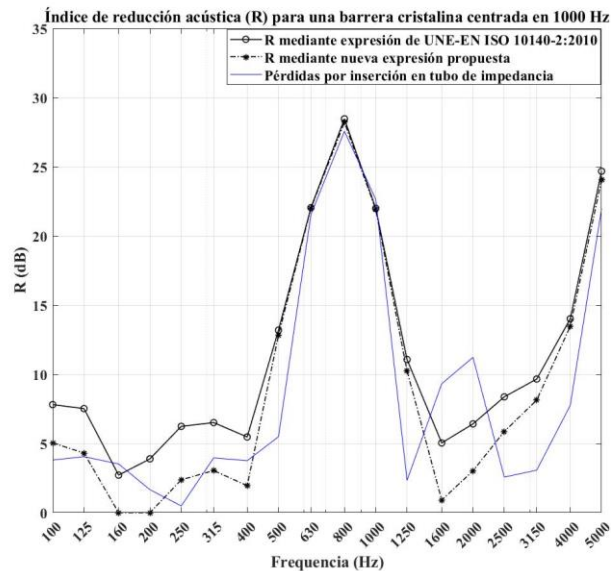


Figura 7-Comparativa entre ambas expresiones

Como se puede observar en esta gráfica, para niveles altos de reducción acústica, en la banda de frecuencia de los 1000 Hz, el nivel devuelto por ambas expresiones es prácticamente idéntico. Sin embargo, a frecuencias bajas, para las que el cristal debería comportarse como un elemento prácticamente transparente, obtenemos unos niveles mediante la expresión de la norma UNE-EN ISO 10140-2:2010[1] que oscilan en torno a los 5 dB, siendo esto poco realista.

Se comparan además los niveles de reducción acústica obtenidos con las pérdidas por inserción (IL), calculadas mediante una simulación de un tubo de impedancia con una única fila de 3 dispersores cilíndricos. Obtenemos niveles muy parecidos a los de las expresiones para la obtención del índice de reducción acústica mientras que, para niveles bajos, la expresión propuesta en este trabajo se ajusta más al valor del IL.

La expresión propuesta en este proyecto en cambio devuelve unos niveles de reducción acústica de 0 dB para las frecuencias que se transmiten a través de la barrera sin apenas dificultades.

4 Conclusiones

Queda clara en la comparación entre ambas expresiones a partir de simulaciones que, para niveles de reducción sonora elevados, el funcionamiento de los dos métodos es el mismo, pudiendo usar cualquiera de las dos expresiones para la obtención de este parámetro.

Sin embargo, si nos encontrásemos ante el estudio de la caracterización acústica de un medio que permita la transmisión total a ciertas frecuencias, sería más apropiado utilizar la expresión desarrollada en este proyecto, dado que devuelve resultados que aparentan una mejor aproximación al nivel real esperado, sin sacrificar los niveles de reducción acústica para toda la banda prohibida de energía.

A partir de ahora, se deberá comprobar el funcionamiento del método a nivel físico, realizando estudios de casos reales en cámara de transmisión, para así terminar de confirmar la utilidad de la nueva expresión propuesta para el cálculo del índice de reducción sonora.

Referencias

- [1] UNE-EN ISO 10140-2:2010. *Medición e laboratorio del aislamiento acústico de los elementos de construcción. Parte 2: medición del aislamiento acústico al ruido aéreo.*
- [2] Olmos Cancino, E.D; *Evaluación de la pérdida de inserción de una barrera acústica aplicada a un proyecto lineal.* Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería. Valdivia, 2002.
- [3] K. S. Yee, *Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media*, IEEE Transactions on Antennas Propag., 14, 302-7, (1966).
- [4] W.L. Bragg, *Diffraction of short electromagnetic waves by a crystal*, Proc. Cambridge Philos., Vol 17, pp 43-57, 1913.
- [5] R.A. Navarro, *Diseño y modelado de pantallas acústicas basadas en cristales de sonido 2D para ruido de ferrocarril*, Universidad Politécnica de Valencia (EPSG), agosto, 2016
- [6] UNE-EN ISO 354:2004. *Medición de la absorción acústica en cámara reverberante.*
- [7] J. Redondo, R. Picó y T. J. Cox, M.Avis, *Prediction of the Random-Inidence Scattering Coefficient Using a FDTD Scheme*, Acta Acústica united with Acustica, Noviembre 2009.
- [8] L. Qing-Huo, T. Jianping. *The perfectly matched layer for acoustic waves in absorptive media.* New Mexico State University, July 1997.