



FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

MEJORA DEL ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE MÉTODOS DE SIMULACIÓN PARA LA EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO ACÚSTICO PROPORCIONADO POR ESTRUCTURAS PERIÓDICAS.

PACS: 43.50 Gf, 43.28 Fp

Peiró-Torres, M.P.¹; Redondo, J.²; Ferri, M.³; Godinho, L.⁴; Amado-Mendes, P.⁴

(1) BECSA, S.A.U.; Dirección: Ciudad del Transporte II. C/ Grecia, 31, Castellón (Spain)

(2) Universitat Politècnica de València. Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de las zonas Costeras, Paraninf, 1. Grao de Gandia. Valencia (Spain).

(3) Universitat Politècnica de València. Centro de Tecnologías Físicas, Acústica, Materiales y Astrofísica. División acústica. Camino de Vera s/n, Valencia (Spain).

(4) ISE, Dept. Civil Engineering, University of Coimbra, (Portugal)

Palabras Clave: Finite Difference Time Domain, Finite Element Method, Multiple Scattering, Method of Fundamental Solutions, Boundary Elements Method, Computational Cost, Simulation, Accuracy.

ABSTRACT

Nowadays, the use of numerical methods to perform wave propagation is widely accepted by the scientific community, however, the accuracy of the different methods has not been studied deeply, in the context of some applications. To improve and extend a previous work, in this paper a comparison between different methods was carried out (Multiple Scattering, Finite Elements Method, Finite Difference Time Domain, Method of Fundamental Solutions and Boundary Elements Method). To carry out this comparative study, the insulation provided by a periodic structure (Sonic Crystal) was performed to evaluate the accuracy achieved as a function of the computational cost consumed, by varying the main configuration parameters of each method.

RESUMEN

Hoy en día, el uso de los métodos numéricos para simular la propagación de ondas está ampliamente aceptado por la comunidad científica, sin embargo, la precisión de los diferentes métodos no ha sido estudiada en profundidad. Para mejorar y ampliar un trabajo previo, en esta comunicación se ha llevado a cabo una comparación entre diferentes métodos (Multiple Scattering, Finite Elements Method, Finite Difference Time Domain, Method of Fundamental Solutions y Boundary Elements Method). Para llevar a cabo este estudio comparativo, se simuló el aislamiento ofrecido por una estructura periódica (Cristal de sonido) con el fin de evaluar la precisión alcanzada en función del coste computacional consumido, variando los principales parámetros de configuración de cada método.



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento acústico de los distintos dispositivos reductores de ruido, mediante simulación por métodos numéricos es una práctica frecuente en la actualidad. La importancia de predecir el rendimiento acústico de los nuevos dispositivos acústicos, incluso antes de fabricar ningún prototipo, ha llevado a la comunidad científica a desarrollar y validar distintos métodos para simular el rendimiento acústico de estos dispositivos. Estos métodos numéricos han contribuido a la mejora de la tecnología en el campo de la acústica y el desarrollo de nuevos materiales y dispositivos reductores de ruido, como lo son los denominados Cristales de Sonido (CS). CS son definidos como materiales heterogéneos formados por redes de dispersores acústicos separados por un determinado parámetro de red y embebidos en otro medio [1], y este nuevo material proporciona un nuevo mecanismo de control de ruido basado en un principio físico denominado "interferencia de Bragg" asociado al proceso de múltiple dispersión. Debido a esta interferencia, la propagación de las ondas se cancela casi por completo en ciertos rangos de frecuencia denominados "band gaps" [2]. Existen multitud de publicaciones donde se demuestra la aplicación de estos nuevos materiales en el desarrollo de dispositivos reductores de ruido, como son las denominadas Pantallas Acústicas basadas en Cristales de Sonido (PACS).

La efectividad y el rendimiento acústico de los CS ha sido simulado por los investigadores utilizando diferentes métodos de simulación. Así, el comportamiento de los CS fue inicialmente simulado para su estudio utilizando la teoría Plan Waves Expansion (PWE) [3], [4]. Más adelante, Sánchez-Pérez et al. [5] desarrollaron la aplicación de la teoría 2D de Multiple Scattering (MS) con el fin de simular estos nuevos dispositivos acústicos y Cao et al. [6] utilizó la metodología de Finite Difference Time Domain (FDTD) para el cálculo de bandas en estructuras cristalinas fonónicas 2D. También el Finite Elements Method (FEM) ha sido utilizado para el análisis de estructuras periódicas y su generación de band-gaps [7], y más recientemente, Sánchez-Pérez et al [8] utilizó un modelo 2D en FEM para el diseño de PACS. En los últimos años, también se han desarrollado otros modelos numéricos para la simulación del comportamiento físico y técnico de las barreras acústicas mediante un Boundary Elements Method (BEM) en 2.5D [9]. Y finalmente, también se han desarrollado algunos trabajos en el ámbito de los CS utilizando técnicas numéricas formuladas en el dominio frecuencia y tiempo con el Method of Fundamental Solutions (MFS) [10], [11].

En este trabajo, se lleva a cabo un estudio comparativo sobre el comportamiento de todos estos métodos numéricos utilizados hasta ahora para la simulación del comportamiento de los CS. Se analiza la precisión y la forma de aproximación al mejor resultado de cada metodología en función del coste computacional que ello conlleva. Este estudio parte de un trabajo previo en el cual ya se realizó una comparativa de algunos de los métodos [12], este trabajo revisa dichos cálculos e incorpora al estudio otros métodos de simulación.

Así, primero son presentados los resultados previos de las simulaciones realizadas por cada uno de los métodos. Después se presentarán la comparativa de costes computacionales analizando los resultados de error que ofrece cada una de las metodologías estudiadas en función de su coste computacional consumido. Y finalmente, se presentan unas conclusiones finales.

RESULTADOS PREVIOS

Para estudiar la comparación entre los diferentes métodos de simulación descritos previamente, se definió un modelo de simulación común a todos ellos. Este modelo de simulación puede observarse en la figura 1 y consiste en un CS compuesto por dispersores cilíndricos dispuestos en red cuadrada en cuatro filas.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

El parámetro de red considerado en este modelo de simulación es $a=1.2/7$, y se dispusieron 36 puntos de medida en red cuadrada separados $a/4$ a lo largo de toda el área de medición comprendida en medio metro en el trasdós del CS. Se genera una onda plana y se definen condiciones periódicas de contorno, con el fin de simular una pantalla acústica semi-infinita.

Para un análisis más adecuado del coste computacional y de la calidad de los cálculos de los diferentes métodos numéricos considerados en esta comunicación, se simulan diferentes medidas de diámetro de los dispersores acústicos cilíndricos. Así, se utilizaron tres medidas de diámetro, las cuales dependían del parámetro de red (0.25a, 0.5a y 0.75a).

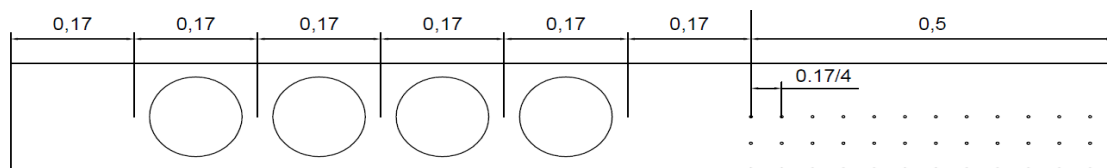


Figura 1. Esquema de simulación

De esta forma, se simulan los datos de presiones acústicas calculadas en cada uno de los puntos definidos como receptores en todos los métodos numéricos utilizados. Una vez se obtiene dicha presión acústica de todos los receptores, se obtiene una media espacial de todos ellos, la media espacial y los datos de presión de la onda plana sin pantalla acústica, permitirán calcular las pérdidas por inserción medias del inglés “average Insertion Loss” (ILa) para toda la distribución frecuencial.

Tras obtener ILa en banda fina, se procede a calcular ILa en bandas de tercio de octava. El cálculo para agrupar estos datos en bandas de tercio de octava varía dependiendo del número de frecuencias considerado en cada banda de tercio de octava. Sin embargo, el coste computacional no depende de dicho número de frecuencias por banda de tercio de octava considerado. Por esta razón, y después de un estudio previo que se describe en secciones posteriores, se confirmó que era suficiente para la obtención de resultados satisfactorios, considerar cuatro frecuencias por cada banda de tercio de octava, resultando así un cálculo de 72 frecuencias para cada uno de los métodos numéricos utilizados. De esta forma, dispondremos de 4 datos de ILa por cada banda de tercio de octava, que agruparemos en un único valor por cada banda de octava.

En la siguiente figura, se pueden observar los valores de ILa agrupados en bandas de tercio de octava calculados para cada uno de los métodos numéricos utilizados en este estudio, y para cada una de los tamaños de dispersores simulados. La similitud de los resultados permite validar el uso de todos los métodos numéricos utilizados.

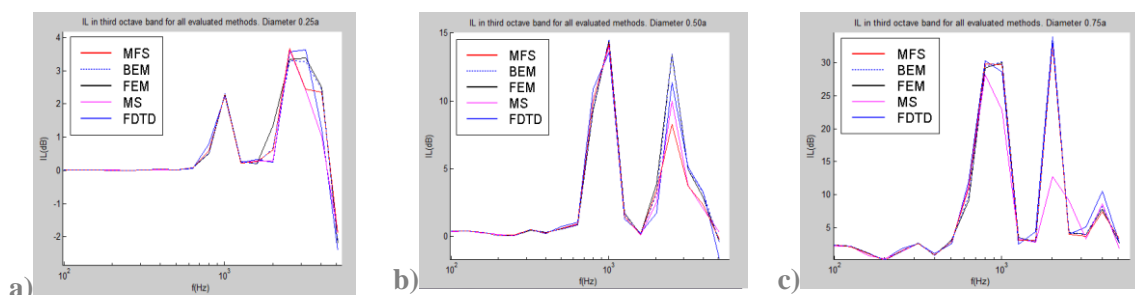


Figura 2. ILa agrupado en bandas de tercio de octava para: a) dispersores de diámetro 0.25a; b) dispersores de diámetro 0.5a; c) dispersores de diámetro 0.75a

CÁLCULO DEL INDICE DE PÉRDIDAS POR INSERCIÓN GLOBAL

Para obtener un único valor con el que poder comparar la precisión de cálculo de los diferentes métodos numéricos considerados, se decidió encontrar un único valor de pérdidas por inserción, el cual fue denominado Índice de Pérdidas por Inserción Global, en inglés "Global Insertion Loss index (ILg). Este ILg fue calculado a partir de las medidas de presión obtenidas por todos los receptores distribuidos por toda el área de medición.

Así, tras la obtención de ILa en bandas de tercio de octava se calcula ILg. Este ILg es ponderado de acuerdo a la distribución del espectro de ruido de tráfico normalizado recogido en la norma EN 1793-3 [13]. Este cálculo de ILg nos proporciona un único valor que determinará el rendimiento acústico de las pantallas simuladas, y servirá para comparar la precisión de los cálculos realizados en cada método numérico utilizado en función del coste computacional consumido para la realización de los cálculos.

Previamente, y con el fin de obtener este ILg, se llevó a cabo un estudio para determinar el número de frecuencias por cada banda de tercio de octava que era óptimo utilizar. Así, y como ejemplo, en la figura 3 se pueden observar los resultados del estudio llevado a cabo en la metodología MFS. En estos resultados puede apreciarse los valores de ILa obtenidos por banda de tercio de octava mediante el empleo de 1 sola frecuencia por banda (nft=1), y hasta 12 frecuencias por banda de tercio de octava (nft=12). Este estudio se llevó a cabo en cada método numérico.

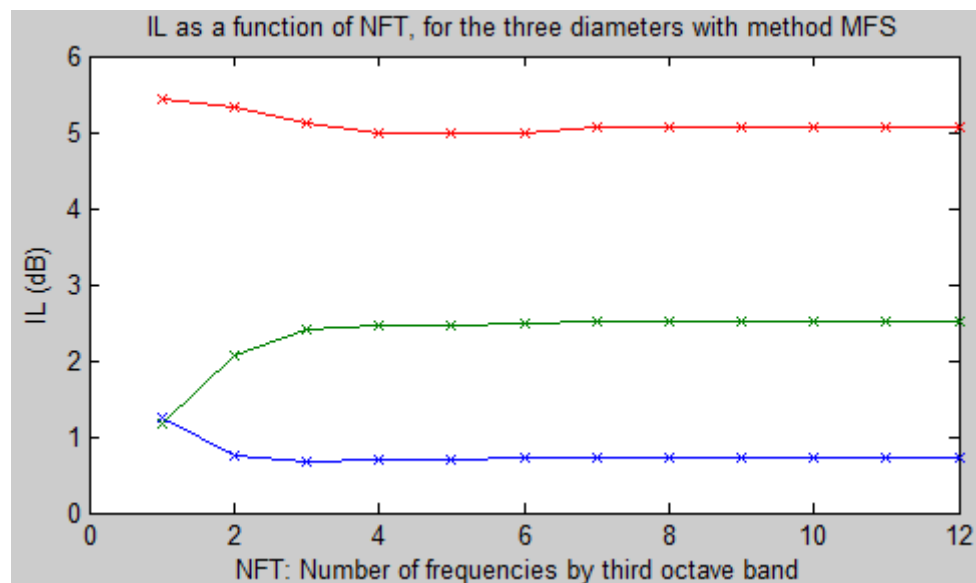


Figura 3. Estudio llevado a cabo para la determinación del número óptimo de frecuencias por banda de tercio de octava en MFS

Finalmente, y tras llevar a cabo este análisis, se concluyó que con 4 frecuencias por tercio de octava era suficiente para obtener resultados sin excesivos errores. Por esta razón, se decidió fijar en número de frecuencias calculadas en 4 para cada tercio de octava en el estudio comparativo para cada método numérico utilizado.

Una vez el número de frecuencias fue fijado, se agruparon dichos cuatro valores en uno solo para cada banda de tercio. Esta agrupación en bandas de tercio era necesaria para aplicar la ponderación del espectro de ruido de tráfico normalizado, puesto que dicho espectro se encuentra también distribuido en bandas de tercio de octava.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18- 24 al 26 de octubre

Después, aplicando la ponderación descrita, se obtuvo el índice de pérdidas por inserción global (ILg) calculado como se ha descrito, el cual determina el rendimiento acústico global de cada dispositivo simulado.

En la siguiente tabla se recogen los diferentes valores de ILg obtenidos por cada método numérico y por cada dimensión de diámetro de dispersores simulado.

	D=0.25a	D=0.50a	D=0.75a
MFS	0.677	2.491	5.013
FDTD	0.659	2.416	5.141
MS	0.637	2.446	5.070
FEM	0.737	2.619	5.086
BEM	0.678	2.563	5.067

Tabla 1. ILg calculados por cada método numérico y por cada dimensión de diámetro de dispersores simulado.

Estos valores determinan que efectivamente, para cuando los parámetros fijados en los métodos de simulación son los de máxima precisión, el resultado de todos ellos confluyen hacia un mismo valor, por lo que la utilización de todos los métodos sería válida para la simulación de este tipo de dispositivos.

COMPARATIVA DE COSTES COMPUTACIONALES

Una vez determinado el número de frecuencias por tercio de octava que sería utilizado para el cálculo en todos los métodos numéricos, se procedió a realizar la simulación del modelo previamente definido en cada uno de los métodos que forman parte del estudio.

Así, se calcularon las pérdidas por inserción por bandas de tercio de octava (ILa) que determinaría el rendimiento acústico de la PACS definida en dicho modelo de simulación. Estos datos de ILa se calcularon variando aquellos parámetros que determinan la precisión en cada uno de los métodos utilizados. Para calcular el error cometido por cada una de las iteraciones, se consideró que el valor ILa hallado fijando los parámetros de cálculo que determinan la mayor precisión era el valor solución (ILs). Así, el error se calculó mediante la diferencia de cada uno de los ILa obtenidos en las iteraciones respecto al valor ILs obtenido con los parámetros de mayor precisión.

En la figura 4 se muestra el resultado de estos errores en función del coste computacional consumido para llevar a cabo cada iteración. Estos cálculos se realizaron para cada uno de los diámetros de dispersores definidos. De esta forma, se puede observar que el error cometido en las iteraciones es menor cuanto mayor es el coste computacional requerido. También se puede observar que a medida que el coste computacional se incrementa, el error cometido converge a cero, puesto que los valores de ILa convergen entre sí.

Las gráficas mostradas en la figura 4 permiten realizar el análisis comparativo objeto del presente estudio. Así, se puede observar cómo de rápidamente converge a ILs algunos métodos como el MFS, o la variabilidad de valores que presentan algunos otros antes de converger al valor solución, como FEM y BEM.

FIA 2018

XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre

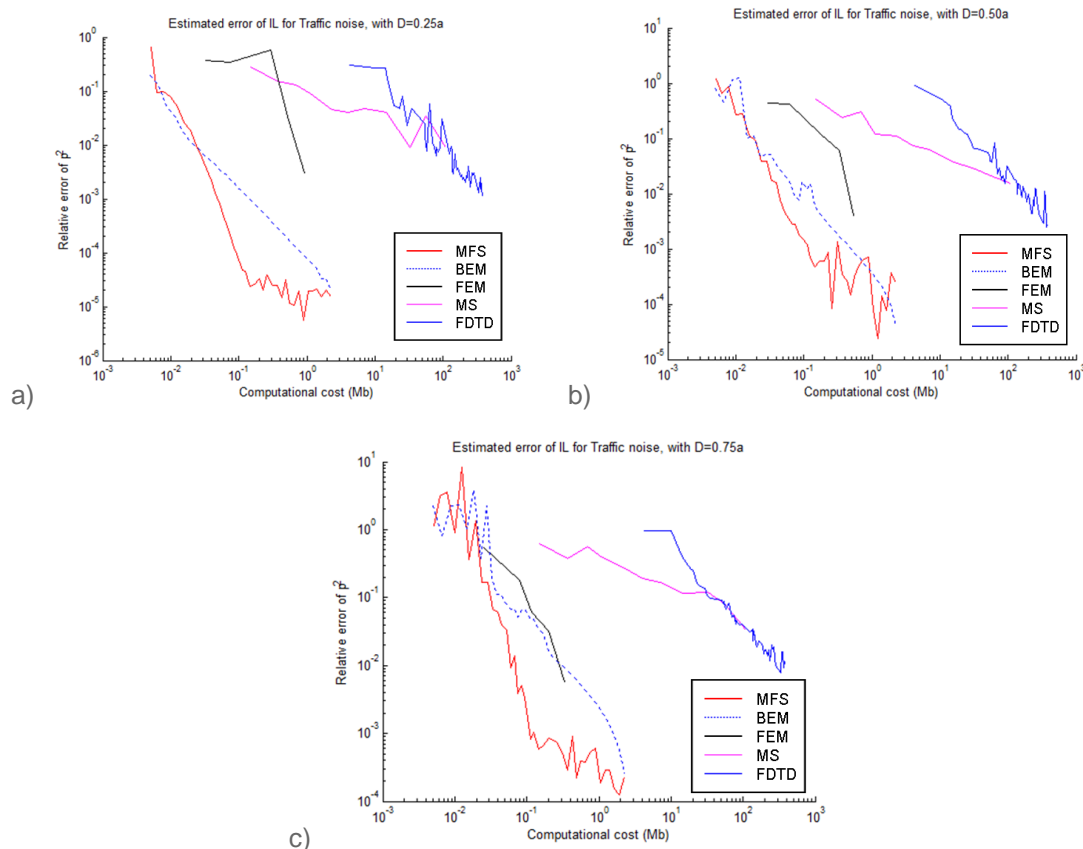


Figura 4. Error relativo de la presión cuadrática simulada –con emisión de ruido de tráfico ponderado según el espectro de ruido de tráfico normalizado– mediante cada uno de los métodos numéricos evaluados. (a) Diámetro del cilindro igual al 25% del paso de red (b) 50% (c)75%

CONCLUSIONES

Tras el análisis comparativo llevado a cabo de los diferentes métodos numéricos considerados, se puede concluir que cada uno de los métodos numéricos requiere un coste computacional distinto para una misma calidad de resultados.

Por supuesto, en todos los métodos numéricos analizados se requiere un mayor coste computacional cuanto más precisión de datos se necesiten, y a mayor precisión, el método nos proporciona menor error en las soluciones, aunque ello conlleve un mayor coste computacional. Sin embargo se observa que algunos métodos numéricos alcanzan altas calidades de cálculo con bajos costes computacionales. Así, MFS converge más rápidamente a los ILs con un menor coste computacional requerido.

Por otro lado, también se observa la influencia del tamaño de los dispersores en el comportamiento del cálculo y en cómo se converge a la solución. Dicha convergencia será peor cuanto mayor sea el tamaño de los dispersores. Además, el tamaño de los mismos también influye en el coste computacional requerido, puesto que mayor tamaño supone un mayor factor



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

de llenado y a mayor factor de llenado el coste computacional también aumenta para obtener un resultado preciso.

Por todo ello se concluye que debido a la peculiaridad de cada método y a su naturaleza de cálculo, la utilización de uno u otro es más apropiada dependiendo de las características del dispositivo a simular.

También, la alta coincidencia de resultados finales obtenidos por todos los métodos analizados validan el uso de todos ellos para la realización de cálculos de rendimiento acústico en PACS.

En cualquier caso, estudios más extensos serán necesarios realizar y se plantea la realización de estudios de tiempos de computación para conocer mejor el comportamiento de cálculo de todos los métodos.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, enmarcado dentro de la convocatoria de ayudas para contratos para la formación de doctores en empresa (doctorados industriales), del Subprograma Estatal de Formación, perteneciente al Programa Estatal de Promoción del Talento y su Empleabilidad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2013-2016. (DI-15-2016).

BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J.V. Sánchez-Pérez, V. Gómez, J. Llinares, F. Meseguer: Sound attenuation by sculpture, Nature London, 1995, 387, 241.
- [2] Y.Y. Chen, Z. Ye: Theoretical analysis of acoustic stop bands in two-dimensional periodic scattering arrays. Physical Review E, 2001, 64(3), 036616.
- [3] E. Yablonovich: Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, Physical Review Letters, 1987, 58(20) , 2059
- [4] S. John: Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices. Physical Review Letters, 1987, 58(23), 2486
- [5] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio, R. Martínez-Sala, R. Sánchez-Grandia, V. Gómez: Acoustic barriers based on periodic arrays of scatterers. Applied Physics Letters, 2002, 81, 5240.
- [6] Y. Cao, Z. Hou, Y. Liu: Convergence problema of plane-wave expansión method for phononic crystals, Physics Letters A 327, 2(2004) 247-253.
- [7] Y.F. Wang, Y.S. Wnang and X.X. Su: Large bandgaps of two-dimensional phononic crystals with cross-like holes. Journal Applied Physics. 110, 11 (2011)
- [8] J.V. Sánchez-Pérez, C. Rubio-Michavila, S. Castiñeira-Ibañez: Towards the development of a software to design acoustic barriers base don Sonic Crystals: an overlapping model, Proceedings of Euronoise 2015, 2015
- [9] C. Prieto Gajardo, L. Godinho, P. Amado-Mendes, J.M. Barrigon Morillas: Numerical analysis of acoustic barriers with a diffusive Surface using a 2.5 Dboundary element model. Journal of Computational Acoustics, 2015, 23(03), 1550009



FIA 2018

**XI Congreso Iberoamericano de Acústica; X Congreso Ibérico de Acústica; 49º Congreso Español de Acústica -TECNIACUSTICA'18-
24 al 26 de octubre**

[10] L. Godinho, D. Soares Jr., P.G. Santos: Efficient analysis of sound propagation in sonic crystals using an ACA-MFS approach. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2016, 69, 72-85.

[11] L. Godinho, P. Amado-Mendes, A. Pereira.: An efficient MFS formulation for the analysis of acoustic scattering by periodic structures. *Journal of theoretical and computational acoustics*.

[12] Parrilla Navarro, M. J., Redondo, J., Sánchez-Pérez, J. V., & Peiró-Torres, M. P. Comparative study of simulation methods for the quantification of the acoustic insulation provided by periodic structures.

[13] EN 1793-3:1998. Road traffic noise reducing devices. Test method for determining the acoustic performance. Normalized traffic noise spectrum.