

ESTUDIO NUMÉRICO DEL RUIDO DE RODADURA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

PACS: 43.50.Lj

Campillo Davo, Nuria¹; Verdú Martínez, Otilia¹; Campello Vicente, Hector¹; Peral Orts, Ramón¹; Godinho, Luís²;

¹Departamento de Ingeniería Mecánica y Energía. Universidad Miguel Hernandez de Elche. Avenida de la Universidad s/n
03202 Elche, Spain

Email: ncampillo@umh.es

²CICC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra,
Rua Luís Reis Santos - Pólo II da Universidade
3030-788 Coimbra, Portugal

Palabras clave: ruido rodadura, BEM, fuentes sonoras, propagación sonora

ABSTRACT

Tyre/road noise is the main noise source in electric vehicles, thanks to the absence of internal combustion engine. Due to the complex emission of such noise source, this paper presents a simplified model of the sound radiation areas of a rolling tyre. The model is based on different combinations of point noise sources and is used to study the sound propagation in the tyre vicinity. The sound pressure levels are analysed at different reception points, with the purpose to identify the combination of noise sources that better reproduces the real sound field.

RESUMEN

La ausencia de motor de combustión en los vehículos eléctricos convierte el ruido de rodadura de los neumáticos en su principal fuente sonora. Dada la compleja emisión de esta fuente, el artículo presenta un modelo simplificado de las zonas de radiación, fundado en el empleo de diferentes combinaciones de fuentes sonoras puntuales, y que sirve de base para un análisis numérico para estudiar la propagación sonora en el entorno del neumático. Finalmente se analizan los niveles sonoros obtenidos en diferentes puntos, con el fin de determinar la combinación de fuentes más adecuada para simular el campo sonoro real.

INTRODUCCIÓN

El ruido producido en la interacción de un neumático en rodadura con el pavimento es una de las más importantes fuentes de ruido de un vehículo, principalmente cuando éste circula a alta velocidad. En estudios previos [1] se ha demostrado que este hecho es independiente del tipo

de vehículo, puesto que a alta velocidad el ruido de rodadura de un vehículo eléctrico es equiparable al de un vehículo convencional. Esto implica que la mejora de las condiciones acústicas ambientales que se prevé por la introducción de vehículos eléctricos o híbridos en entornos urbanos, se reduzca considerablemente cuando se alcanzan velocidades extra-urbanas.

El ruido de rodadura ha sido ampliamente estudiado desde 1970, lo que ha permitido identificar los mecanismos que generan la emisión sonora en la interacción del neumático con el pavimento. No obstante, a pesar de las décadas de estudio sobre este tema, actualmente no existe un consenso acerca del peso sobre la emisión total que tienen los diferentes mecanismos que producen el ruido de un neumático en movimiento. Esto es debido principalmente a la compleja emisión de esta fuente sonora, en la que entran en juego multitud de factores como el tipo de neumático, las características de la superficie de rodadura o las condiciones de conducción. A su vez, la paulatina implantación del vehículo eléctrico en el parque automovilístico mundial requiere el desarrollo de neumáticos específicamente diseñados para este tipo de vehículos, que generalmente difieren de los neumáticos convencionales en sus dimensiones, en los dibujos y en la profundidad de los surcos de la banda de rodadura.

En la literatura se pueden encontrar trabajos recientes sobre nuevas líneas de investigación enfocadas a estudiar el ruido generado por neumáticos para vehículos eléctricos. En esta línea, en [2] se presenta un estudio sobre la influencia en el ruido de rodadura de nueve juegos de neumáticos destinados a vehículos eléctricos. El trabajo concluye que la máxima diferencia de niveles sonoros en ensayos pass-by entre dos juegos de neumáticos nunca excede de 3,6 dB para bajas velocidades (20-50 km/h), mientras que para velocidades superiores (50-120 km/h) la dispersión nunca excede los 2,4 dB. Asimismo, también apuntan que no existe ninguna relación entre el ruido que indica el etiquetado de los neumáticos analizados con el ruido que emiten en condiciones reales de circulación. Una posible respuesta a este hecho es que el tipo de superficie que se emplea durante los ensayos de homologación de ruido de los neumáticos es muy lisa, y por tanto genera pocas vibraciones en el neumático. Por otro lado, en el trabajo recogido en [3] se analiza el ruido de rodadura emitido por una amplia muestra de neumáticos para vehículos eléctricos, mediante mediciones en banco de ensayos. Del trabajo se desprende que los nuevos diseños de neumáticos generan unos niveles sonoros similares a los neumáticos convencionales. En esta línea también en [4] realizan una campaña de medidas CPX en una muestra de neumáticos que también incluye modelos para vehículos eléctricos. De su trabajo se desprende que hay una potencial reducción del ruido de rodadura, estimada en unos 2-3 dB, cuando se usan los nuevos neumáticos en combinación con pavimentos de baja emisión sonora como superficies porosas o superficies de pequeña granulometría.

De los trabajos anteriores se observa por tanto que la emisión sonora de los neumáticos para vehículos eléctricos es similar a la de los convencionales, y que como técnicas de evaluación se siguen empleando las metodologías ampliamente extendidas para neumáticos convencionales: CPX, Drum, Pass-by, Coast-by. Además, existen otras técnicas usadas para analizar las áreas de radiación y localizar las fuentes de ruido en neumáticos convencionales. Estas técnicas, que también podrían usarse para los nuevos diseños, abarcan las medidas de intensidad sonora [5], la holografía acústica de campo cercano [6] y la técnica de mapeo de vibraciones [7]. Es comúnmente aceptado que las principales áreas de radiación sonora se localizan cerca de los bordes de ataque y salida de la huella de contacto, donde se producen los impactos mecánicos del neumático contra el pavimento, y siendo dicha emisión un tanto mayor en el ataque que en la salida. Además, la zona del flanco cercana a la huella de contacto es también una importante área de radiación. Y finalmente, también se debe tener en cuenta la emisión a bajas frecuencias que generan la banda de rodadura y el flanco en las zonas más altas del neumático.

A pesar de que la emisión de la rodadura de un neumático no está por tanto claramente definida, sí que hay un consenso general sobre las áreas de emisión más importantes. En este sentido, en [8] la superficie del neumático se segmenta para aislar las fuentes que componen el ruido de rodadura con el fin de poder ser tratadas como fuentes aisladas. En otros estudios [9,10] el neumático ha sido caracterizado por una serie de monopolos localizados sobre su superficie. Y en otros casos [11,12], toda la emisión sonora se ha concentrado en un punto localizado en el flanco cerca de la huella de contacto. Por tanto, es usual representar el neumático como una distribución de una única o varias fuentes sonoras localizadas en las diferentes zonas de radiación.

En este artículo se presenta un trabajo preliminar de la emisión de un neumático en rodadura, basado en un modelo discretizado de las diferentes áreas de radiación. Para ello, se ha realizado un análisis numérico, empleando la metodología BEM (Boundary Element Method) en el que se usan cuatro combinaciones diferentes de fuentes sonoras que definen su emisión y permiten estudiar la propagación en el entorno del neumático. En el estudio se propone desde la combinación más simple, compuesta por una única fuente localizada en el flanco cerca de la huella de contacto, hasta una combinación compuesta por cinco fuentes, pasando también por un modelo de dos fuentes y otro de tres. La energía sonora de cada fuente se ajusta en función de su localización, y la propagación resultante de estos modelos se analiza mediante los niveles de presión sonora recibidos en diferentes planos horizontales.

GENERACIÓN SONORA DE UN NEUMÁTICO

De acuerdo con lo que se ha comentado en el punto anterior, la emisión sonora de un neumático y los mecanismos que intervienen durante su generación es un tema complejo. No obstante, está consensuado que en el proceso de emisión sonora de un neumático se producen desde fenómenos físicos asociados a las vibraciones mecánicas de la carcasa del neumático hasta mecanismos asociados con fenómenos aerodinámicos en el entorno del neumático [13], por lo que se considera conveniente mencionarlos aquí. Los efectos vibratorios son los causantes de las emisiones a bajas frecuencias, por debajo de los 1000Hz, y se producen debido a los impactos de la banda de rodadura contra el pavimento. Aquí se incluyen los impactos de los bloques del neumático y de las irregularidades de la calzada, y son la causa de vibraciones radiales y tangenciales en la banda de rodadura y el cinturón que se propagan a los flancos. Además, los mecanismos vibratorios están vinculados a los fenómenos de adhesión que causan vibraciones tangenciales en el neumático, tales como el efecto conocido como stick-slip producido por el movimiento relativo entre los elementos de la escultura de la banda de rodadura y el pavimento, o el efecto stick-snap producido por la adhesión del material del neumático a la calzada y que genera vibraciones radiales y tangenciales. Respecto a los mecanismos aerodinámicos, éstos generan emisiones sonoras de más alta frecuencia, por encima de los 1000Hz, y son producidos por la compresión y expansión del aire recluso en las cavidades que se generan entre el neumático y el pavimento. En este tipo de fenómenos se incluyen efectos debidos al bombeo del aire en estas cavidades, turbulencias, así como radiación sonora debido a efectos resonantes. Aparte de estos dos grandes grupos de mecanismos, también se identifican otros mecanismos como por ejemplo el efecto bocina producido por la cavidad con forma de cuerno que se crea entre los bordes de entrada y salida de la huella de contacto, el neumático y la calzada, y que amplifica el sonido. Y por último también se deben considerar las impedancias acústicas y mecánicas de las cavidades y del pavimento respectivamente, así como las resonancias del cinturón y del aire en el interior del neumático.

MODELOS NUMÉRICOS

El método de los elementos de contorno es una de las principales técnicas numéricas empleadas para análisis de propagación sonora, en particular en dominios que implican un medio sin límites o semi-infinito. No obstante, esta técnica puede conllevar limitaciones de tamaño en estudios con un gran número de elementos. Con el fin de evitar esto, el algoritmo empleado para el estudio incluye un algoritmo ACA (Adaptive-Cross-Approximation) descrito en [14] y empleado en [15]. En el algoritmo empleado, la ecuación de diferencias parciales de Helmholtz se emplea para representar la propagación espacial del sonido en el dominio de la frecuencia. A continuación, la solución fundamental de la presión sonora se calcula tras incluir una fuente puntual (o una combinación de ellas) localizada en el espacio de propagación, y

considerando también otras características del entorno de propagación como por ejemplo superficies reflectantes [16].

En la Figura 1 se muestran las configuraciones de fuentes sonoras empleadas en los diferentes modelos. El primer modelo, M1, se compone de una fuente sonora (número 1) localizada en la zona del flanco del neumático que queda centrada con la huella de contacto. La segunda configuración, M2, consiste en dos fuentes sonoras (números 2 y 3), localizadas junto a los bordes de ataque y salida, en el centro de la banda de rodadura. El modelo M3 está formado por una combinación de los dos modelos anteriores, es decir por las tres fuentes anteriores juntas (fuentes número 1, 2 y 3). Finalmente, la configuración M4 se está compuesta por las mismas fuentes que M3 a las que se suman dos fuentes más en las zonas superiores – frontal y trasera - de la banda de rodadura (modelo formado por las fuentes número 1, 2, 3, 4 y 5).

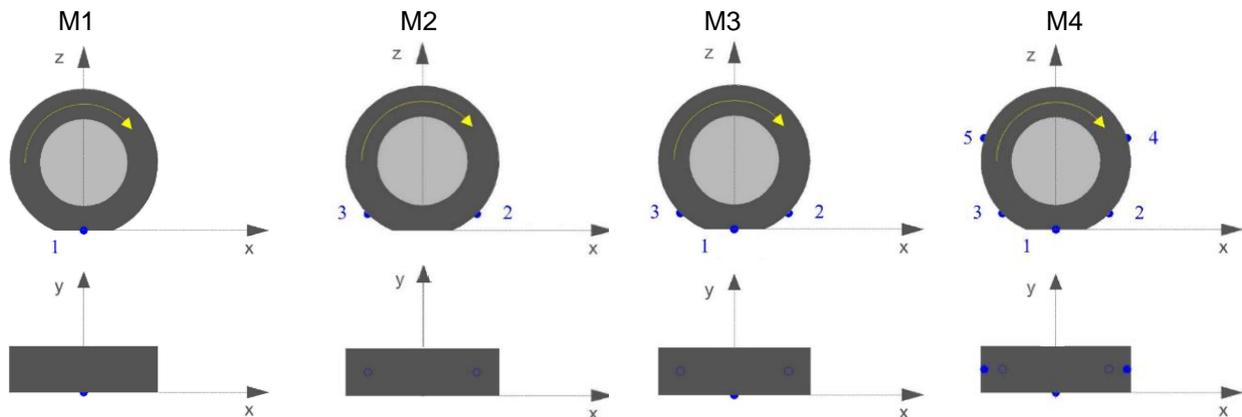


Figura 1. Combinaciones de fuentes sonoras bajo estudio.

El modelo geométrico se ha aproximado a un neumático de dimensiones 175/70 R13, instalado en un modelo simplificado de carrocería, como se muestra en la Figura 2. La deflexión vertical del neumático, formando la huella de contacto, también se ha considerado en el modelo geométrico diseñado. El modelo considera que la huella de contacto se sitúa sobre una superficie reflectante.

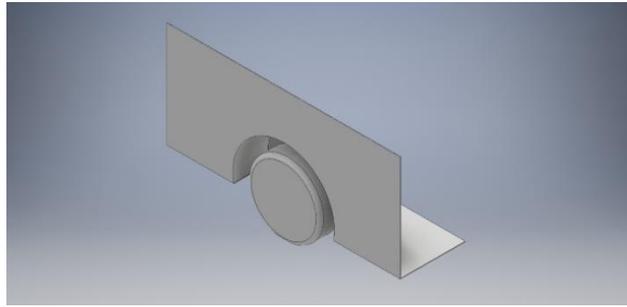


Figura 2. Modelo geométrico diseñado.

El sonido emitido por cada fuente en los diferentes modelos se ha configurado teniendo en cuenta las características generales de la emisión sonora de un neumático, según las consideraciones comentadas anteriormente, y se ha ajustado empleando información experimental registrada en un trabajo anterior. Como regla general, la emisión de las fuentes sigue un patrón simétrico, con una ligera emisión superior en la parte frontal que en la trasera del neumático. Finalmente, la emisión sonora de las dos fuentes localizadas en el área superior del modelo M4, tiene una mayor energía que el resto de fuentes, a bajas frecuencias – hasta 630Hz - , con el fin de simular las vibraciones de la banda de rodadura y el flanco en las áreas superiores del neumático.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El campo sonoro resultante en el entorno del neumático es analizado en planos horizontales localizados a 0,1m, 0,15m, 0,45m y 0,75m de altura respecto al suelo, y para las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava de 315 a 2500Hz. La Figura 3 muestra, en azul oscuro, el neumático y la carrocería del vehículo, así como los mapas sonoros, nivel de presión sonora, del campo generado a 500Hz, 1000Hz y 2500Hz en los diferentes planos de análisis, para las configuraciones de fuentes M2 y M4.

En general, los mayores niveles sonoros en los diferentes planos se obtienen para la frecuencia de 1000Hz. Para el modelo M2, donde las dos fuentes están localizadas cerca de los bordes de ataque y salida y no hay fuente en el flanco, se observa el efecto de apantallamiento de la carrocería. Como consecuencia, se detecta un campo sonoro menos ruidoso en los dos planos superiores – 0,45m y 0,75m -, principalmente para las frecuencias de 1000 y 2500Hz. En el campo sonoro del modelo M4, formado por cinco fuentes, se observa de nuevo el efecto de apantallamiento producido por la carrocería del vehículo también sobre la propagación de las fuentes número 4 y 5. En un estudio anterior [17] se ha comprobado que el modelo M1, formado por una única fuente en el flanco, presenta un campo sonoro con un patrón muy

simétrico. No obstante, esta simetría se ve afectada en aquellos modelos con más fuentes, debido al efecto de una emisión un tanto superior en la zona delantera del neumático con respecto a la trasera y también a las reflexiones producidas por la carrocería. El modelo M3 resulta ser una combinación de los resultados de los modelos M1 y M2.

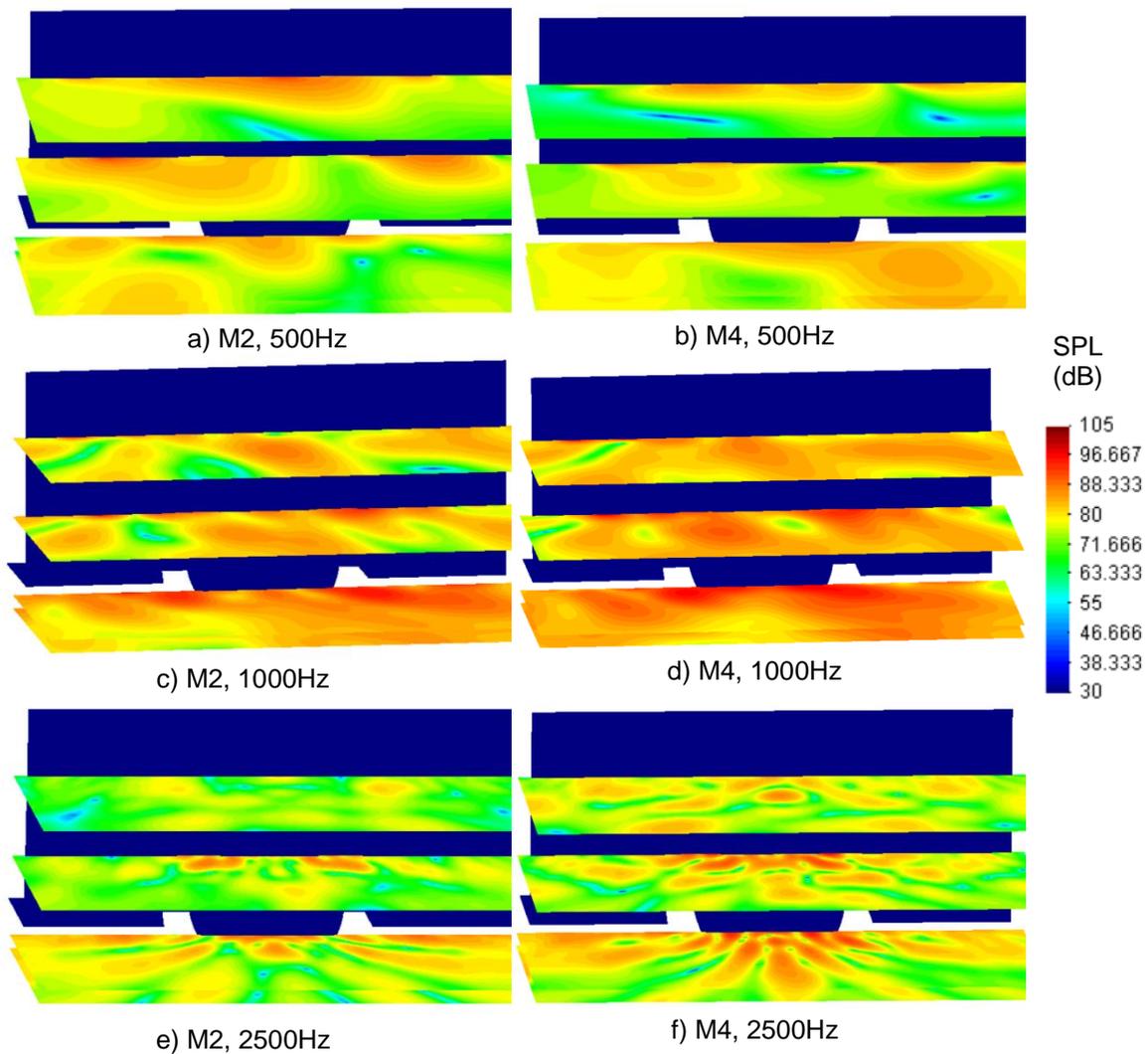


Figura 3. Niveles de presión sonora para los modelos M2 y M4, a 500Hz, 1000Hz y 2500Hz.

De un modo general para todos los casos, las emisiones para frecuencias más altas presentan un patrón de radiación más direccional que aquellas a frecuencias más bajas. Esto se puede observar especialmente en la Figura 3 e) y f) para los planos más bajos, donde se muestran unos lóbulos predominantes cerca de las principales fuentes de ruido próximas a los bordes de ataque y salida. En la figura también se observa el efecto de la interferencia de las ondas y las reflexiones sobre la carrocería, lo que genera unos mapas sonoros más complejos.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado en este artículo muestra los resultados preliminares de un estudio numérico de la propagación sonora en el entorno de un neumático en rodadura. El estudio, llevado a cabo mediante la técnica BEM, se centra en analizar el efecto de discretizar la emisión sonora del neumático a través de fuentes sonoras puntuales situadas en sus áreas de radiación. Para ello, se han propuesto cuatro modelos con diferentes combinaciones de fuentes, compuestos por una fuente sonora o el más complejo compuesto por cinco. Los resultados muestran que el modelo M4, el de cinco fuentes, genera un campo sonoro más realista cuando éste se compara con resultados experimentales previos. Este modelo presenta dos fuentes sonoras localizadas en la zona superior, delantera y trasera, de la banda de rodadura, lo que confirma que las áreas más altas del neumático también deben ser tenidas en cuenta a la hora de la emisión total. El equipo investigador está actualmente desarrollando nuevas mejoras al modelo, incluyendo más fuentes sonoras así como considerando otras condiciones geométricas.

Finalmente, destacar que este modelo simplificado permitirá reproducir el campo sonoro de la rodadura de un vehículo, y se pretende que sea la base para el posterior diseño del campo sonoro total de vehículos eléctricos o híbridos. De este modo, se podrán diseñar sonidos de advertencia, que sumada a la emisión sonora que produce la rodadura, generen una emisión sonora total que optimicen la detectabilidad del vehículo.

REFERENCIAS

- [1] Campello-Vicente, H.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Velasco-Sanchez, E. The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, Vol 116, pp 59-64. 2017.
- [2] Martin Czuka; Marie Agnes Pallas; Phil Morgan; Marco Conter. Impact of potential and dedicated tyres of electric vehicles on the tyre-road noise and connection to the EU noise label. *Transportation Research Procedia*, Vol 14, pp2678-2687. 2016.
- [3] Jerzy Ejsmont; Beata Swieczko-Zurek; Stanislaw Taryma; Piotr Mioduszewski. Noise Generated by Tyres Designed for Electric Vehicles - Results of Laboratory Experiments. *Proceedings of EuroNoise 2015*. Maastricht. 2015.
- [4] Truls Berge; Frode Haukland; Piotr Mioduszewski; Ryszard Wozniak. Tyre/road noise of passenger car tyres, including tyres for electric vehicles – road measurements. *Proceedings of EuroNoise 2015*. Maastricht. 2015.

- [5] Donovan, P.R.; Oswald, L.J. The identification and quantification of truck tire noise sources under on-road operating conditions. Research Publication No. GMR-3380, General Motors Research Laboratories, Warren, Michigan, USA. 1980.
- [6] Ruhala, R.J. A study of tire/pavement interaction noise using near-field acoustical holography. PhD thesis. Penn State University, PA, USA. 1999.
- [7] Bernhard, R.J.; Franchek, N.M.; Drnevich, V.P. Tire/pavement interaction noise research activities of the Institute for Safe, Quiet and Durable Highways. Proceedings of INTER-NOISE 2000. Nice, France. 2000.
- [8] Morgan, P.A.; Phillips, S.M.; Watts, G.R. The localisation, quantification and propagation of noise from a rolling tyre. Transport Research Foundation (TRL), Published Project Report PPR 138, July 2006.
- [9] Berckmans, D; Kindt, P; Sas, P; Desmet, W. Evaluation of substitution monopole models for tire noise sound synthesis. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 24, pp 240-255. 2010.
- [10] Kuijpers, A; van Blokland, G. Simulation tool for road/tyre modelling: the influence of road parameters on tyre/road noise. SILENCE project. Deliverable C.D2. 2006.
- [11] Anfosso-Lédée, F. Modeling the local propagation effects of tire-road: propagation filter between CPX and CPB measurements. Proceedings of INTER NOISE 2004. Prague, Czech Republic. 2004.
- [12] Peeters, B; Kuijpers, A. The effect of porous road surfaces on radiation and propagation of tyre noise. Proceedings of ACOUSTICS 2008. Paris, France. 2008.
- [13] Sandberg, U; Ejsmont, J.A. Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, Sweden. 2002.
- [14] Liu, Y.J.; Mukherjee, S.; Nishimura, N.; Schanz, M.; Ye, W.; Sutradhar, A.; Pan, E.; Dumont, N. A.; Frangi, A.; Saez, A. Recent Advances and Emerging Applications of the Boundary Element Method. Applied Mechanics Reviews, Vol 64-3, 2012, 030802.
- [15] Godinho, L.; Amado-Mendes, P.; Santos, P. G.; Cordeiro, M. An efficient and accurate numerical model for the 3D analysis of sonic crystals. Proceedings of 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, July 12-16, 2015.
- [16] Godinho, L.; Costa, E.; Santiago, J.; Pereira, A.; Amado-Mendes, P. 3D analysis of the sound reduction provided by protective surfaces around a noise source. International Journal of Acoustics and Vibrations, Vol 19(2), pp 78-88, 2014.
- [17] Campillo-Davo, N.; Campello Vicente, H.; Peral-Orts, R.; Velasco-Sánchez, E.; Sánchez-Lozano, M.; Verdú-Martínez, O. Numerical study of the acoustic field emitted by a rolling tyre. Proceedings of the EAEC 2017 Congress. Madrid, Spain. 2017.



48º CONGRESO ESPAÑOL DE ACÚSTICA
ENCUENTRO IBÉRICO DE ACÚSTICA
EUROPEAN SYMPOSIUM ON UNDERWATER ACOUSTICS
APPLICATIONS
EUROPEAN SYMPOSIUM ON SUSTAINABLE BUILDING
ACOUSTICS