

PROPUESTA DE MODELO NUMÉRICO DE UN VEHÍCULO PARA EL ANÁLISIS SONORO PRODUCIDO POR IRREGULARIDADES EN LA CALZADA.

PACS: 43.40.Kd

Fabra-Rodríguez, Miguel¹; Peral-Orts, Ramón²; Campello-Vicente, Héctor³; Campillo-Davó, Nuria⁴; Espinosa-Mora; Paula⁵.

¹Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658861, mfabra@umh.es.

²Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658579, ramon.peral@umh.es.

³Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 965222446, hcampello@umh.es.

⁴Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, 966658446, ncampillo@umh.es.

⁵Universidad Miguel Hernández, Avda. Universitat sn., 03203, Elche, España, paula.espinosa01@goumh.umh.es.

Palabras Clave: Modelo Impacto, Irregularidades Calzada, FEM, BEM.

ABSTRACT.

Tyre-road interaction noise is one of the sub-sources that constitute the vehicle as a noise source. Its relative importance is growing as modern vehicles develop, as in the case of electric vehicles. Impact noise is the predominant mechanism at low speeds in situations where obstacles are encountered on the road. For this reason, a model is presented that combines a dynamic analysis using finite elements method and an acoustic analysis using boundary elements method to study these circumstances. The dynamic analysis simulates a quarter of a vehicle by means of a 3D tyre on which a lumped model with mass, spring and damper is placed. This analysis generates the contact against the obstacle. The vibration produced on the tyre is used as a sound source in the acoustic analysis in order to study the sound propagation from the appropriate boundary conditions.

RESUMEN.

El ruido de interacción neumático-calzada es una de las subfuentes que conforman al vehículo como foco de ruido. Su importancia relativa crece a la par que se desarrollan los vehículos modernos, como ocurre en el caso de los vehículos eléctricos. El ruido de impacto es el mecanismo predominante a baja velocidad en las situaciones que se encuentran obstáculos en la calzada. Por este motivo, se presenta un modelo que combina un análisis dinámico mediante elementos finitos y un análisis acústico mediante elementos de contorno que permite estudiar estas circunstancias. El análisis dinámico simula un cuarto de vehículo a través de un neumático en 3D sobre el que se sitúa un conjunto de masa suspendida, muelle y amortiguador. Mediante este análisis se genera el contacto contra el obstáculo. La vibración producida sobre el neumático se utiliza como fuente sonora en el análisis acústico para poder estudiar la propagación sonora a partir de las condiciones de contorno apropiadas.

1. INTRODUCCIÓN

El vehículo como fuente generadora de ruido se ha estudiado tradicionalmente como un conjunto de diferentes sub-fuentes sonoras [1]: El ruido de interacción neumático-calzada, el

ruido aerodinámico y el ruido mecánico del motor y del sistema de tracción. El estudio y comprensión de estos diferentes mecanismos sigue siendo de vital importancia, ya que el tráfico rodado es el foco de contaminación acústica que a mayor cantidad de población afecta en entornos urbanos e interurbanos [2]. Por debajo de 50 km/h, el ruido del sistema de propulsión predomina de forma clara por encima del ruido de interacción neumático-calzada mientras que el ruido aerodinámico se hace despreciable a estas velocidades de circulación [3]. Por otro lado, los avances actuales en el sector de la automoción reducen de forma paulatina las emisiones sonoras [4], llegando a eliminar por completo el ruido del sistema de propulsión en el caso de los vehículos electrificados [5].

De esta forma, a las velocidades de circulación propias de los entornos urbanos, la atenuación sonora de los vehículos puede llegar a ser total, pero siguen existiendo situaciones específicas en las que se produce un incremento de la emisión sonora debido a la presencia de irregularidades en el firme, como ocurre con los elementos reductores de velocidad [6]. Este hecho ha sido estudiado también por los autores del presente documento mediante ensayos experimentales sobre un vehículo eléctrico circulando sobre diferentes tipologías de reductores de velocidad. La Figura 1 muestra diferentes imágenes obtenidas gracias al uso de la cámara acústica durante dichos ensayos.

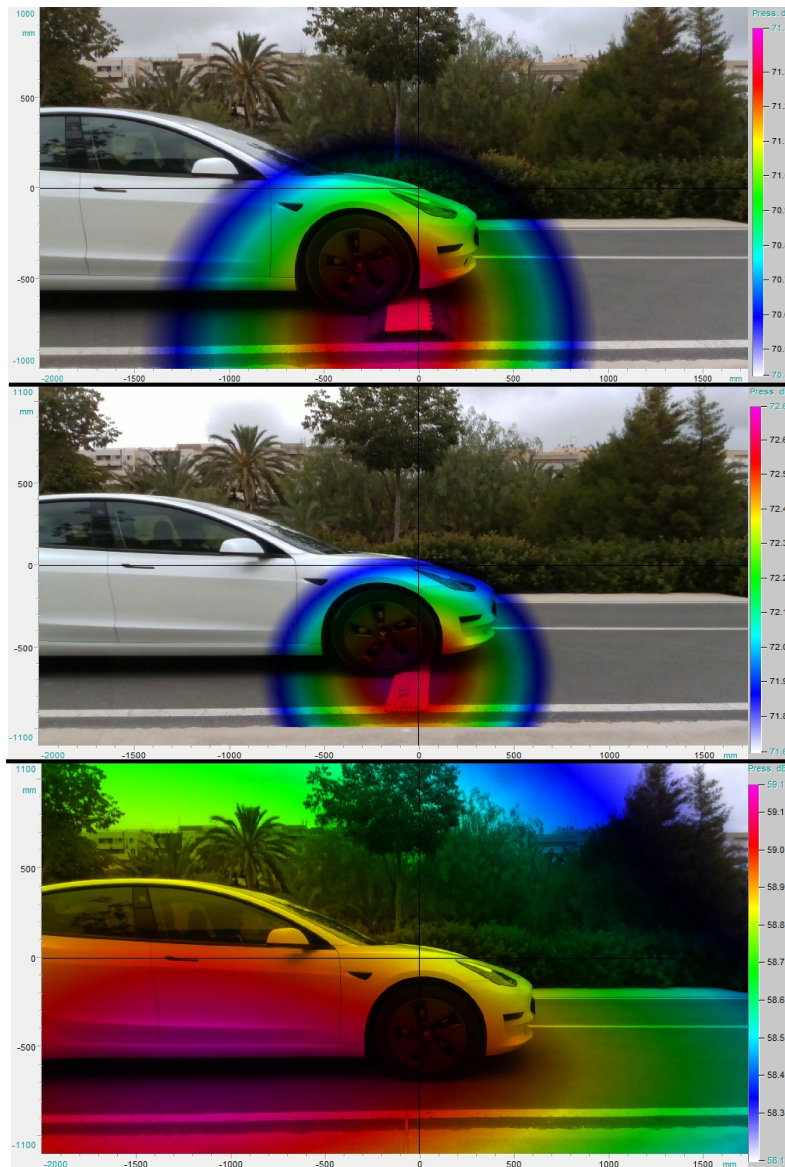


Figura 1 – Tesla Model 3 a 10 km/h en el instante de contacto contra dos reductores de velocidad y paso normal del vehículo.

En la Figura 1 se puede apreciar un incremento de en torno a 12 dB al pasar el vehículo sobre los reductores de velocidad frente a su circulación normal. Por ello se propone un modelo numérico para el análisis sonoro producido por irregularidades en la calzada. El modelo consta de dos pasos: en primer lugar, se realiza un análisis dinámico mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) para estudiar la vibración que se produce sobre la superficie del neumático que es utilizada posteriormente como fuente sonora en un análisis de propagación acústica mediante el Método de los Elementos de Contorno (BEM).

El modelo parte del desarrollo iniciado en [7] para estudiar el ruido de impacto de un neumático contra una superficie plana. En dicho documento, el neumático se consideraba como un elemento aislado del resto del vehículo al que se le incorporaba el efecto de la presión de inflado y el peso de la llanta. El modelo ha sido mejorado al dotar a las diferentes partes del neumático de características específicas de material y pudo ser validado mediante un ensayo experimental de caída libre contra el firme.

2. MODELO

La explicación del modelo se divide en dos partes: la primera corresponde a la simulación dinámica en el dominio temporal empleando FEM y la segunda a la simulación acústica en el dominio frecuencial empleando BEM.

2.1. Simulación dinámica

De forma tradicional se ha estudiado la dinámica vertical de un vehículo a través de un modelo agrupado de 2 grados de libertad que representa $\frac{1}{4}$ de vehículo [8]. Este modelo se muestra en la Figura 2 A. donde:

- m_s es la masa suspendida del vehículo.
- k es la rigidez de la suspensión.
- C es el coeficiente de amortiguamiento de la suspensión.
- m_t simboliza la masa no suspendida, como son el neumático y la llanta.
- k_t es la rigidez del propio neumático.
- c_t es el coeficiente de amortiguamiento del neumático.

El sistema planteado modeliza al neumático en 3D mediante FEM sobre el que se sitúa la masa no suspendida m_s a través del resorte de rigidez k y el amortiguador de coeficiente c como se muestra en la Figura 2 B.

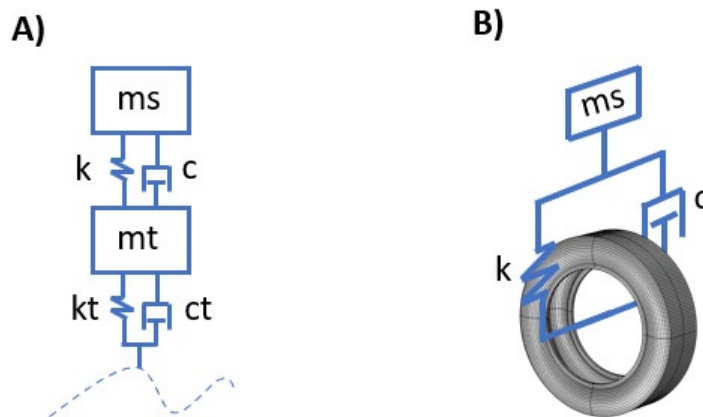


Figura 2 – Modelos de suspensión de $\frac{1}{4}$ de vehículo: A. Modelo agrupado tradicional y B. Modelo propuesto.

La Figura 3 muestra las condiciones de contorno del modelo FEM dinámico. El neumático se caracteriza como un sólido elástico lineal con libertad de desplazamiento vertical, mientras que el suelo se modeliza como un sólido rígido que se desplaza horizontalmente a la velocidad de circulación v . Entre el neumático y el suelo se aplica una condición de contacto gracias a la cual se produce el impacto en el momento que la irregularidad alcanza al neumático.

El interior del neumático está sometido a una presión de inflado mientras que los contornos en contacto con la llanta, marcados en amarillo, se modelizan como elementos rígidos indeformables para simular el efecto de la llanta sin tener que generar su geometría en 3D. Sobre el centro de masas de estos contornos, señalado en la imagen como *RMC*, se aplican tanto el peso de la llanta como la fuerza recibida del sistema de suspensión. La aceleración de la gravedad afecta a todo el modelo, incluyendo tanto la parte FEM como a la suspensión.

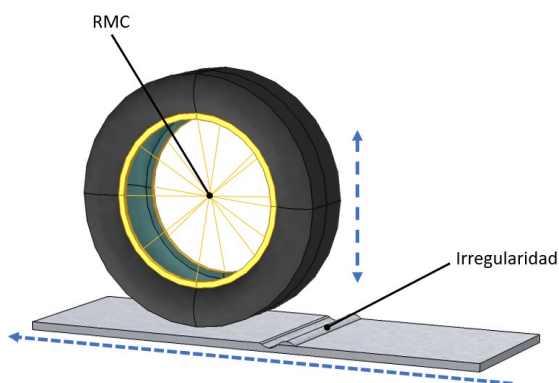


Figura 3 – Modelo dinámico del impacto.

A la hora de ejecutar las simulaciones, se realiza un paso previo estacionario para que el neumático adquiera la deformación inicial de partida y se genere la huella de contacto. Posteriormente se realiza el análisis temporal con un paso de tiempo inverso a la frecuencia de muestreo deseada para el posterior análisis sonoro.

2.2 Simulación acústica

Tras el análisis dinámico se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) al campo de aceleraciones \ddot{u} de la superficie del neumático durante una ventana de tiempo determinada. De esta forma, podemos relacionar la vibración del neumático con la presión sonora p en el dominio de la frecuencia según la Ecuación 1, donde n es el vector unitario normal a la superficie y ρ es la densidad del medio.

$$-n \cdot \left(-\frac{1}{\rho} \nabla p \right) = n \cdot \ddot{u} \quad (1)$$

El análisis sonoro se realiza mediante BEM, cuya principal ventaja es que no necesita discretizar el volumen de aire, lo que lo hace especialmente apropiado para estudiar la propagación acústica en entornos abiertos. Los análisis sonoros se realizan de forma estacionaria para cada una de las frecuencias discretas obtenidas en la FFT.

Las condiciones de contorno del modelo se muestran en la Figura 4. La geometría del neumático, sobre la que se mapea la aceleración de la vibración obtenida en el análisis anterior, actúa como fuente sonora. La llanta ahora se modeliza como una superficie reflectante y se añaden dos planos reflectantes: El horizontal actúa como representación de la superficie de la calzada, y el vertical, situado a una distancia de la mitad del ancho de vías del vehículo d , actúa como plano de simetría para añadir la contribución de la rueda en paralelo. De esta forma se obtiene un modelo sonoro de $\frac{1}{2}$ del vehículo.

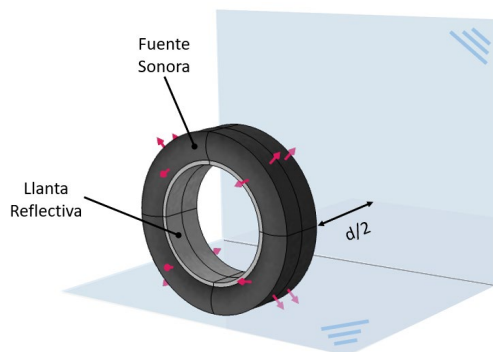


Figura 4 – Modelo acústico de la propagación sonora.

Tras el cálculo en barrido de todas las frecuencias de estudio se obtiene el nivel de presión sonora total en el post procesado como la suma logarítmica de cada una de las contribuciones.

3. RESULTADOS

Para ejemplificar la utilidad del modelo se ha simulado el comportamiento sonoro del neumático al afrontar dos tipologías de irregularidades:

- A) Bache clasificado por la bibliografía como de severidad alta [9]: Hueco de profundidad 5.08 cm y longitud de 45.7 cm .
- B) Resalto reductor de velocidad prefabricado, cuyas dimensiones son las más acusadas permitidas por la norma española [10]: Arco circular de altura 7 cm y base 60 cm .

Las simulaciones dinámicas se han realizado a una velocidad v de 10 km/h , con un neumático de dimensiones $205/55\text{ R }16$, con las características tipo de suspensión de rigidez $k\ 20000\text{ N/m}$ y amortiguamiento $c\ 3000\text{ N}^*\text{s/m}$ y con una masa m de 400 kg . La Figura 5 muestra diferentes fotogramas de las simulaciones ejecutadas para ambos tipos de irregularidades.

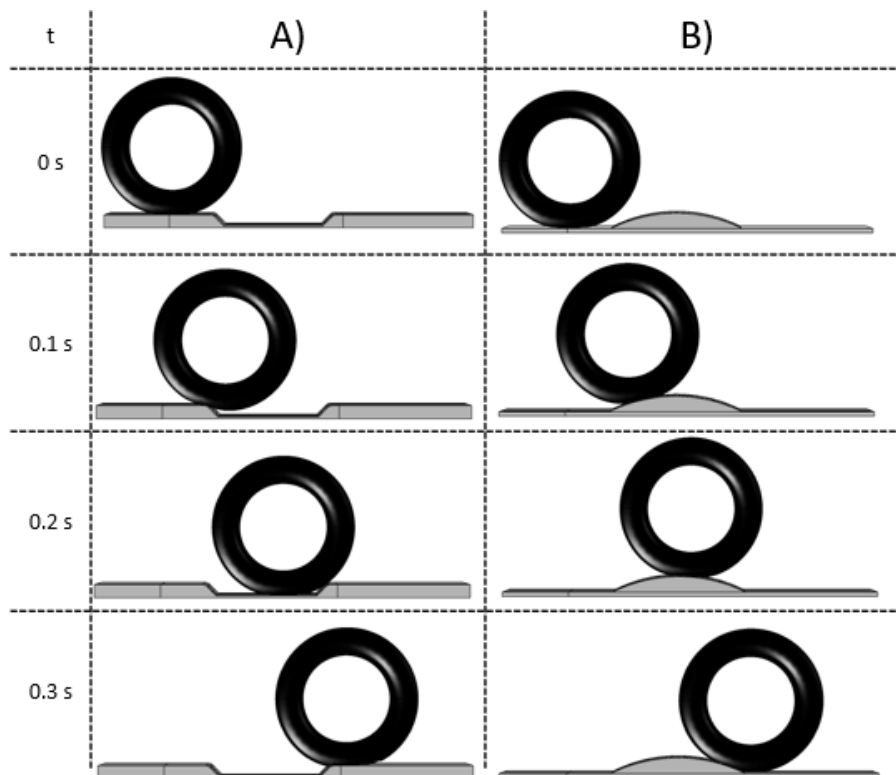


Figura 5 – Fotogramas de la simulación dinámica: A) Bache y B) Resalto.

Se ha aplicado la FFT en una ventana de tiempo de 0.125 s sobre la vibración del neumático desde el instante en el que se produce el impacto para cada una de las simulaciones. De esta forma, la vibración se utiliza como fuente sonora para el análisis acústico, donde se ha realizado un barrido frecuencial que abarca desde la banda de 100 Hz hasta la de 1000 Hz.

Los resultados de la propagación acústica en el entorno del neumático se muestran en la Figura 6, donde se grafica el nivel sonoro en dB. En cuanto a las flechas superpuestas, A indica el sentido de avance del vehículo modelado y L es la dirección perpendicular orientada hacia el exterior.

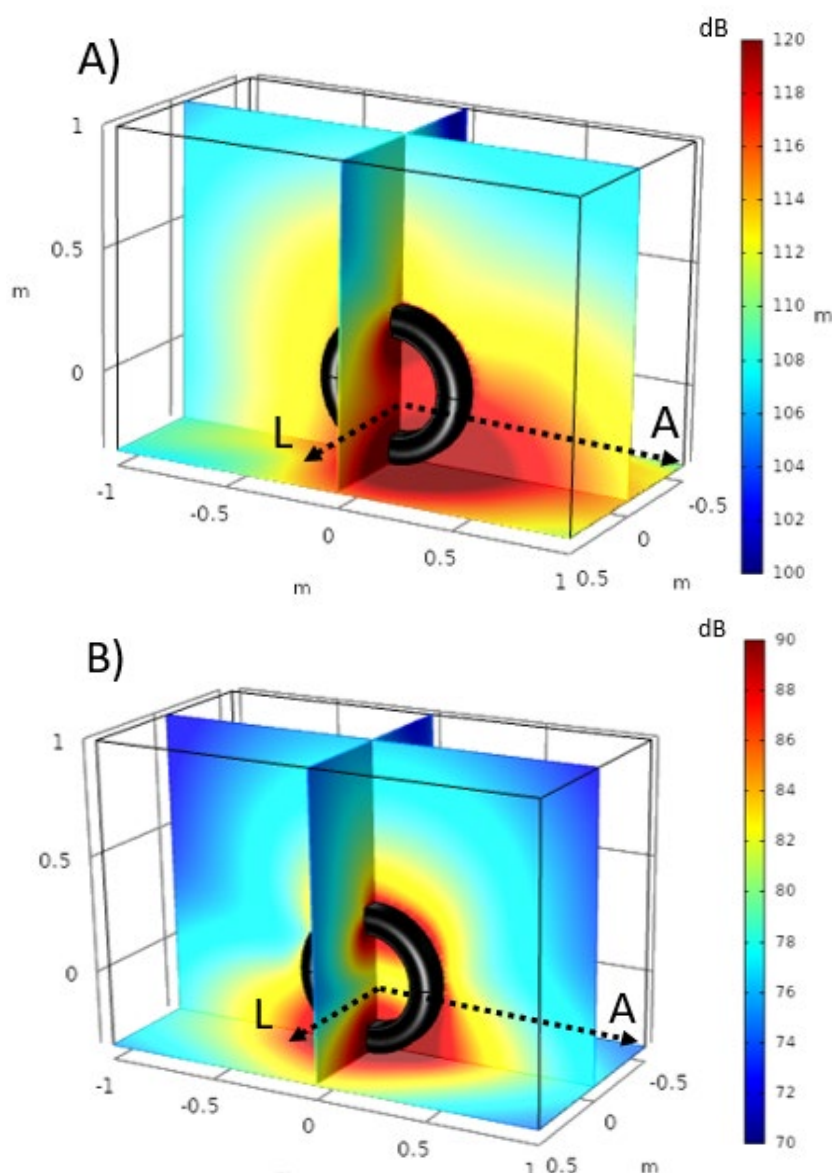


Figura 6 – Nivel sonoro en el entorno del neumático: A) Bache y B) Resalto.

El nivel sonoro obtenido en la simulación del bache es del orden de los 30 dB mayor que en el resalto, debido a que el bache implica un impacto contra el suelo y un choque contra su lateral muy acusado, mientras que el perfil en forma de arco del resalto suaviza el impacto.

Se puede analizar también lo que ocurre a mayor distancia gracias al uso del análisis sonoro mediante BEM. La Figura 7 muestra la propagación en un plano horizontal a una altura de 1.5 m del suelo. Los diferentes colores ploteados indican la longitud del radio R sobre el que se evalúa el nivel de presión sonora para ambos tipos de irregularidad.

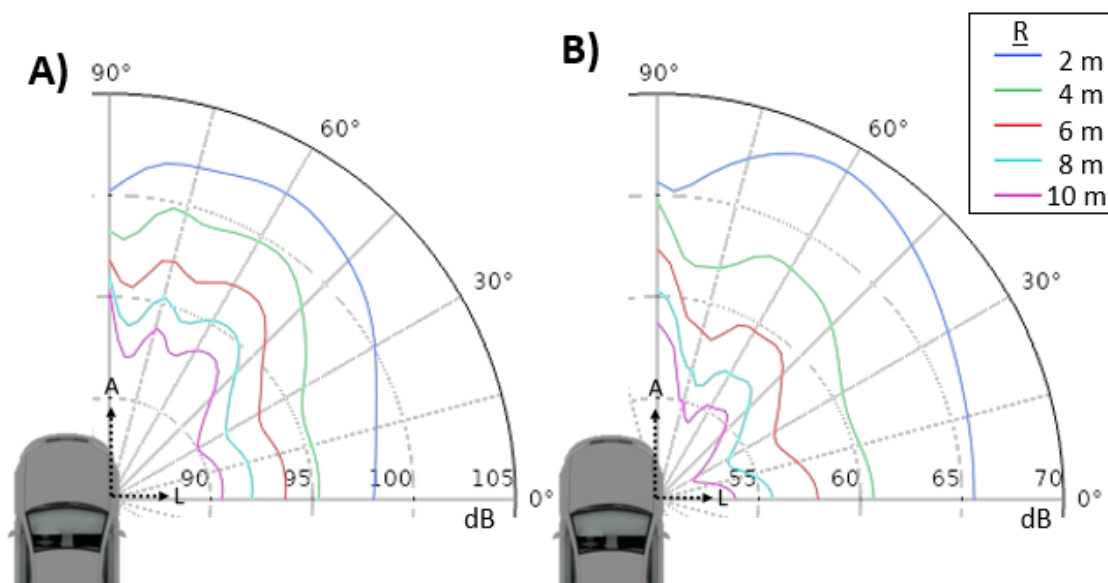


Figura 7 – Gráficos polares del nivel sonoro a 1.5 m de altura: A) Bache y B) Resalto.

De esta forma se pueden obtener más interpretaciones, como, por ejemplo, que un viandante que se encuentre en acera alineado con la irregularidad (0° y 2 m) percibiría en torno a 98 dB del paso de un vehículo por un bache o 66 dB en el caso del reductor de velocidad. También se puede apreciar que la directividad del sonido hacia delante del vehículo (desde los 60°) aumenta con la distancia de evaluación.

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un modelo numérico que combina FEM y BEM el cual permite el estudio del ruido de impacto producido por el paso de un vehículo sobre irregularidades en la calzada. El modelo consta de un primer análisis dinámico en el que se concretan aspectos tales como la geometría del neumático y de la irregularidad, el valor de la suspensión y la velocidad de circulación entre otros. El análisis sonoro posterior permite determinar la propagación sonora del ruido generado.

Las irregularidades estudiadas a modo de ejemplo en este documento son un bache y un resalto reductor de velocidad. El modelo es paramétrico, lo que implica una gran flexibilidad de uso, pero su principal limitación es que no se modelizan detalles del orden de los milímetros, por lo que el efecto de la rugosidad de la calzada queda excluida del estudio.

Los trabajos actuales del modelo se centran en la comparación de los resultados simulados con los ensayos en pista. Posteriormente el modelo pretende ser una herramienta de diseño de elementos sonoros que se sitúen sobre la calzada y también de análisis para incorporar nueva información a los modelos de tráfico rodado existentes.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Pablo Alloza y a Gfai Tech por permitirnos el uso de la Acoustic Camera. Esta instrumentación fue utilizada durante los ensayos de circulación del vehículo eléctrico sobre reductores de velocidad y permite localizar visualmente el ruido de impacto entre el neumático y el obstáculo.

REFERENCIAS

- [1] Nelson, P. *Transportation Noise Reference Book*, Butterworths-Heinemann, 1987.
- [2] European Environment Agency, *Environmental noise in Europe 2020*, EEA Report 22/2019.
- [3] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A. *Tyre/road noise reference book*, Kisa, Sweden: Informex; 2002.
- [4] Sancho, S.; Gaja, E.; Peral-Orts, R.; Clemente, G.; Sanz, J.; Velasco-Sánchez, E. Analysis of sound level emitted by vehicle regarding age. *Applied Acoustics*, 126, 2017, pp 162-169.
- [5] Campello-Vicente, H.; Peral-Orts, R.; Campillo-Davo, N.; Velasco-Sanchez, E. The effect of electric vehicles on urban noise maps. *Applied Acoustics*, 116, 2017, pp 59-64.
- [6] Behzada, M.; Hodaieia, M.; Alimohammadib, I. Experimental and numerical investigation of the effect of a speed bump on car noise emission level. *Applied Acoustics*, 68(11-12), 2007, pp 1346-1356.
- [7] Fabra-Rodríguez, M.; Peral-Orts, R.; Campello-Vicente, H.; Campillo-Davó, N.; Simón-Portillo, F.J. Numerical tyre impact model combining Finite Element and Boundary Element Methodologies. *Euronoise 2021*, Madeira (Portugal), October 2021.
- [8] Navarro-Arcas, A.; Sanchez-Mateo, S.; Paricio-Caño, M.M.; Velasco-Sanchez, E.; Sanchez-Navarro, M. Metodología experimental para determinar el coeficiente de amortiguamiento del sistema de suspensión de un vehículo. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*. Castellon (Spain), November 2012.
- [9] Shahin, M. *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*, Springer, 2006.
- [10] Dirección General de Carreteras (Ministerio de Fomento), *Instrucción Técnica para la instalación de reductores de velocidad y bandas transversales de alerta en carreteras de la Red de Carreteras del Estado*, Orden FOM/3053/2008.