



Análisis de las vibraciones generadas por el tráfico en entornos urbanos

Miguel Fabra Rodríguez¹, Julián Ortiz Umaña², Pablo Gianoli Kovar², Ramón Peral Orts¹, Elizabeth González Fernández², Héctor Campello Vicente¹

¹ Instituto de Investigación en Ingeniería de Elche, Universidad Miguel Hernández de Elche, mfabra@umh.es, ramon.peral@umh.es, hcampello@umh.es

² Departamento de Ingeniería Ambiental (IMFIA), Universidad de la República, j.ortiz@fing.edu.uy, pgianoli@fing.edu.uy, elizabet@fing.edu.uy

Este trabajo busca analizar las vibraciones generadas por el paso de diferentes tipos de vehículos en entornos urbanos, con especial énfasis en el transporte público, debido a la tendencia de electrificación del parque móvil que se está produciendo actualmente.

Para ello, se han evaluado las vibraciones producidas por el paso de autobuses, tanto térmicos como eléctricos, en las inmediaciones de las vías de diferentes localizaciones de la ciudad de Montevideo (Uruguay), con el objetivo de proteger de los efectos nocivos de las vibraciones a las viviendas cercanas. A su vez, se han realizado también medidas de vibraciones en la ciudad de Elche (España).

Paralelamente, se ha desarrollado un modelo de elementos finitos que permite predecir la propagación de las vibraciones debidas a la circulación de vehículos. Este modelo se encuentra parametrizado para poder comparar los efectos vibracionales de diferentes categorías de vehículos, así como de diferentes tipologías de calzada.

1. Introducción

La exposición a las vibraciones generadas por el tráfico rodado puede tener serias repercusiones en la vida de los ciudadanos que se ven afectados por molestias de tipo psicofísico [1]. Además, las vibraciones generan incomodidad en la población local, ya que existe la preocupación de que las vibraciones producidas por el tráfico de vehículos pesados puedan dañar sus viviendas [2].

Aunque las vibraciones del tráfico no suelen ser un peligro inmediato para los edificios, pueden deteriorar su condición con el tiempo, especialmente en estructuras antiguas o dañadas por terremotos. Las vibraciones de pequeña amplitud repetida a lo largo de muchos ciclos debilitan las construcciones con mampostería causando daños estéticos [3]. Los monumentos, como la Villa Farnesina en Roma, son especialmente vulnerables, y se han implementado sistemas antivibraciones para protegerlos [4].

Las vibraciones inducidas por el tráfico representan un desafío significativo para la comodidad y el bienestar de los residentes que viven cerca junto a vías y carreteras [5]. El estudio presentado por Kowalska-Koczwara *et al.* destaca los efectos de estas vibraciones en la percepción humana dentro de edificios residenciales y comerciales. Este estudio comparó la evaluación de las señales de las vibraciones mediante los valores RMS y VDV, valor que tiene en cuenta la duración de la señal además de la amplitud. El trabajo concluye indicando que cuanto más pesado es el vehículo, mayor es la influencia sobre las personas, especialmente al circular sobre calzadas rugosas [6]. En otro estudio, estos autores abordan los errores frecuentes en la evaluación del impacto de las vibraciones en los ocupantes de los edificios, señalando que la existencia de diferentes directrices nacionales dificulta el proceso de diagnóstico [7].

Las vibraciones del tráfico se producen cuando el pavimento y el neumático del vehículo entran en contacto, provocando una transmisión de fuerzas que generan ondas influenciadas por la distancia, la topografía entre la fuente y el receptor, y otras características geotécnicas del suelo [8], siendo las ondas Rayleigh las más importantes para la propagación de las vibraciones inducidas por el tráfico rodado [9]. La fuerza vertical aplicada por los neumáticos sobre la superficie de la calzada se puede separar en dos componentes: una componente estática debida al peso y una componente dinámica variable con el tiempo [10]. Las contribuciones principales a la componente variable son la frecuencia natural de la masa suspendida del vehículo, las fuerzas de impacto generadas por la masa no suspendida y las fuerzas generadas por la rodadura.

La transmisión de estas vibraciones ha despertado el interés de algunos autores para emplearlas como medida de la velocidad de la circulación de los vehículos [11] o incluso para su clasificación en diferentes tipologías [12] [13] a través de la monitorización del tráfico mediante acelerómetros.

Como se ha indicado, los vehículos pesados, debido a su masa, son los que generan vibraciones de mayor amplitud, que se ven acentuadas si las condiciones del pavimento no son óptimas. Dada la cantidad y la frecuencia de paso en entornos urbanos, los autobuses son uno de los principales objetivos a analizar en este trabajo. Las vibraciones producidas por los autobuses han sido estudiadas desde el punto de vista de sus ocupantes [14], prestando especial atención a la posición del conductor [15] que es la persona con la exposición más prolongada a las vibraciones.

Los modelos numéricos de generación de vibraciones se han desarrollado principalmente para el estudio del paso de trenes [16], debido al mayor peso y velocidad de este tipo de vehículos, así como de las discontinuidades sobre el terreno que imponen la presencia de las traviesas bajo las vías. Algunos estudios han desarrollado modelos del paso de vehículos no ferroviarios al circular sobre irregularidades de la calzada [17] [18]. Estos modelos se componen de un primer análisis de sistemas masa-muelle para determinar la componente dinámica de las fuerzas del paso de un vehículo pesado sobre un resalto. Posteriormente, esta generación se emplea como entrada en un modelo de propagación de una vía simplificada por elementos finitos.

En este artículo se presentan los primeros avances de los autores al medir las vibraciones producidas por la circulación de vehículos en las proximidades de la calzada, trabajado motivado por la creciente tendencia de electrificación del parque móvil del transporte público en las ciudades [19]. De esta forma, a través de las medidas tomadas en Uruguay, se pretende comprobar si los vehículos eléctricos, además de ser alternativas más sostenibles, presentan diferencias en cuanto a la generación de vibraciones refiere, como ocurre con los niveles de ruido ocasionados [20]. Adicionalmente, este documento presenta un primer modelo de elementos finitos que simula la generación y propagación de las vibraciones producidas por la circulación de un vehículo a través del desplazamiento longitudinal de cargas estáticas por la calzada.

2. Metodología

2.1. Medidas experimentales

La campaña de medidas se ha realizado de forma independiente en la ciudad de Montevideo (Uruguay) y en Elche (España).

En Montevideo se seleccionaron cinco diferentes localizaciones con un único sentido de circulación donde las calles contaban con pavimento de hormigón o de asfalto en buenas condiciones. La instrumentación empleada consta de un acelerómetro piezoeléctrico de baja frecuencia modelo 4534-N-002 Brüel & Kjær conectado a un sonómetro, de clase 1 tipo 2250 Brüel & Kjær. El sonómetro actúa como sistema de adquisición de datos para el acelerómetro y no registra la señal de ruido. El acelerómetro se fijó al suelo con cinta adhesiva de doble cara en dirección vertical a diferentes distancias del borde de la calzada. Para la toma de datos del paso de vehículos se almacenaron los valores de aceleración RMS en intervalos de segundos.

Para obtener el nivel N de vibración en dB a partir de los datos medidos de aceleración RMS a en m/s^2 se emplea la Ecuación 1.

$$N(\text{dB}) = 20 \log_{10} \frac{a}{10^{-6}} \quad (1)$$

En Elche se escogieron localizaciones con poca densidad de tráfico para facilitar la toma de medidas del paso de vehículos aislados. La instrumentación utilizada consta de un acelerómetro uniaxial PCB 601A01 PCB conectada a una tarjeta de adquisición cRIO-9233 de National Instruments. El acelerómetro se fijó al suelo en dirección vertical mediante un imán y una pletina de acero adherida al firme mediante adhesivo. La toma de datos se efectuó mediante el software Labview que registró la señal de aceleración en el tiempo con un trigger de accionamiento manual que permitía registrar el evento de interés.

Para las medidas tomadas en ambas ciudades se procuró que las vibraciones a registrar de la circulación de un vehículo no debían verse interferidas por el paso de otro vehículo. La Figura 1 muestra dos fotografías del montaje experimental durante el proceso de medida en ambas ciudades.



Figura 1: Toma de medidas experimentales.

2.2. Modelo de elementos finitos

El modelo de elementos finitos ha sido desarrollado en el software COMSOL Multiphysics. La geometría del modelo consta de una porción de vía que cuenta con calzada, acera y diferentes capas de terreno. Las diferentes capas del terreno se caracterizan como materiales elástico-lineales cuyas características de Módulo de Young, coeficiente de Poisson y densidad han sido obtenidas de estudios geotécnicos. A la mitad de la longitud de la geometría se localiza el punto de evaluación de las vibraciones verticales que actúa como posición del acelerómetro.

Todas las dimensiones del modelo han sido parametrizadas para ser modificadas de forma rápida a través de una tabla y así poder generar diferentes tipologías de calles de forma sencilla. Algunos de los parámetros considerados son: longitud, ancho de la calzada, altura del bordillo, profundidad de cada capa o distancia del centro del carril hasta el punto de evaluación.

Las condiciones de contorno del modelo se resumen en la Figura 2. Toda la geometría se encuentra rodeada de un volumen de Perfectly Matched Layers (PML). Este contorno permite absorber las ondas que inciden sobre ellas para que no se reflejen de nuevo hacia el interior de la geometría, logrando así la condición de campo abierto en la propagación de las vibraciones. La simulación del paso de un vehículo a lo largo de la calzada se logra mediante la imposición de fuerzas verticales de valor constante correspondientes al peso del vehículo que recae sobre cada rueda. El peso por rueda se distribuye sobre un área rectangular equivalente a la huella de contacto. Las huellas de contacto se desplazan a lo largo de unas bandas de desplazamiento sobre la calzada a la velocidad de circulación deseada. Esta velocidad, el peso del vehículo, el ancho de vías o la batalla son valores que se encuentran de nuevo parametrizados para poder simular diferentes categorías de vehículos.

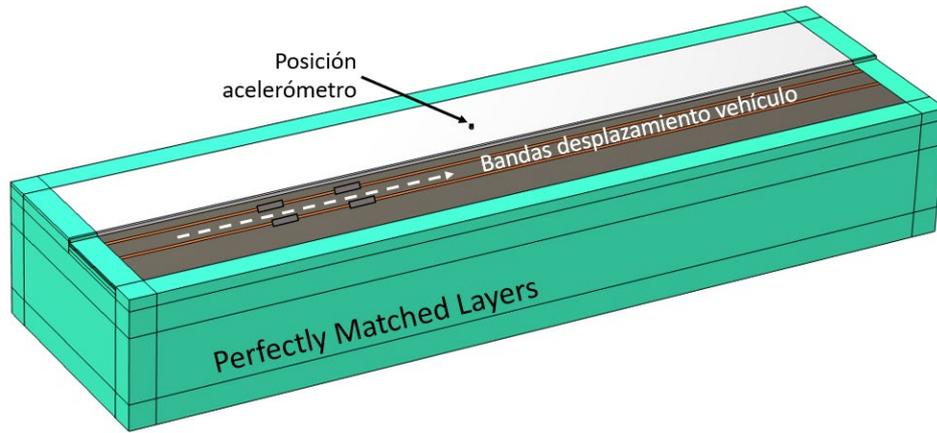


Figura 2: Condiciones de contorno del modelo.

3. Resultados

Los primeros resultados presentados son los obtenidos de las medidas tomadas en Montevideo, en el Bulevar Juan Benito Blanco entre Juan María Pérez y Francisco Solano Antuña. En esta localización el acelerómetro se situó sobre el bordillo de la acera junto al borde de la calzada. En dicho punto se midió el paso de autobuses, tanto de propulsión térmica como eléctrica, circulando a una velocidad de 30 km/h. Los autobuses térmicos son Mercedes-Benz modelo Torino Urbano mientras que los eléctricos son BYD modelo k9.

La Tabla 1 muestra el mayor de los valores RMS obtenidos al muestrear cada segundo las vibraciones producidas por el paso de un autobús. Los valores medidos del paso de un autobús eléctrico se acotan entre los 93,8 y los 95,3 dB, mientras que los valores registrados al circular los autobuses térmicos superan los 99,8 dB.

Tabla 1: Valores de vibración RMS máximos de la circulación de autobuses en Montevideo.

Aceleración	Fondo	Autobuses					
		Térmicos			Eléctricos		
		1	2	3	1	2	3
(m/s ²)	0,0082	0,1998	0,0999	0,0979	0,0579	0,0491	0,0524
(dB)	78,3	106,0	100,0	99,8	95,3	93,8	94,4

Por otro lado, los siguientes resultados se corresponden con las medidas tomadas en la Avenida de Jubalcoi en Elche. Las medidas realizadas en Elche se llevaron a cabo para obtener señales temporales ante diferentes condiciones de circulación. La Figura 3 muestra la señal en el tiempo de las vibraciones en el eje vertical medidas en el bordillo de la acera ante diferentes situaciones: paso de un autobús sobre una tapa de registro, circulación de un autobús y medida de fondo. En este caso, el autobús era de propulsión eléctrica modelo Solaris Urbino 12 circulando a una velocidad de 50 km/h.

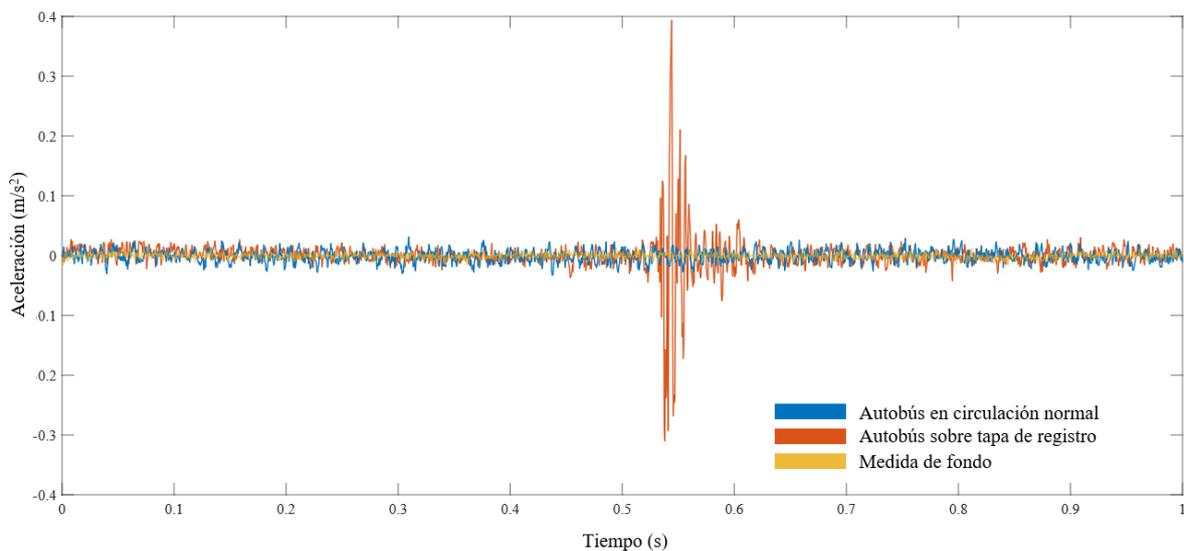


Figura 3: Señales temporales de aceleración de diferentes medidas realizadas en Elche.

Cuando el neumático del autobús golpea la tapa de registro se produce un aumento de la amplitud de la vibración que alcanza un valor pico de $0,4 \text{ m/s}^2$, incrementando más de 10 veces la amplitud de la vibración de la circulación normal de este vehículo. Por otro lado, durante el proceso de medida no se pudo registrar el paso de turismos ya que no producían una señal de vibración que superase la medida de fondo.

En lo referente a las simulaciones, la geometría del modelo numérico se ha adaptado a la calzada de la localización de Elche donde se obtuvieron los resultados anteriores. También se ha configurado la magnitud y las distancias entre las fuerzas para que sean equivalentes al peso y dimensiones del autobús que circulaba. La Figura 4 muestra diferentes fotogramas de la simulación en el dominio temporal del paso del autobús a 50 km/h donde la escala de color representa el desplazamiento de la superficie en metros.

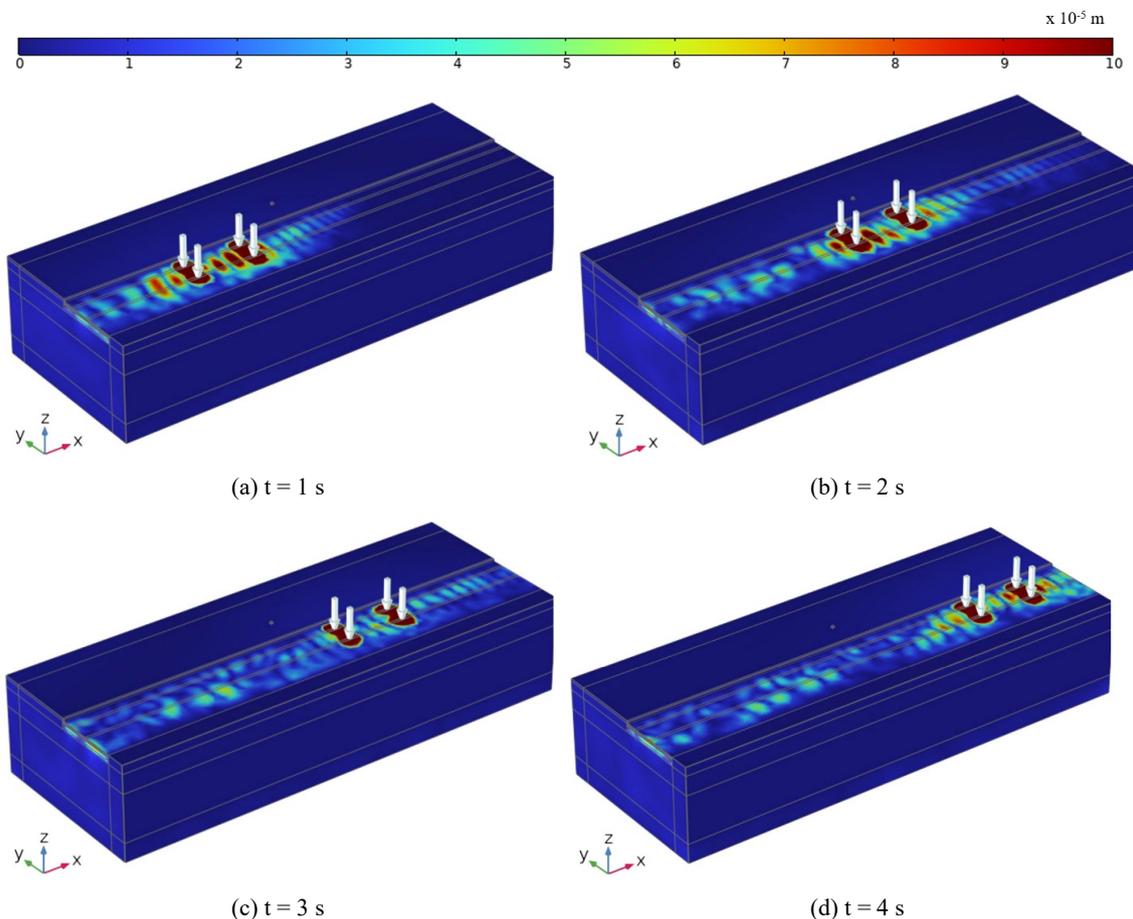


Figura 4: Diferentes fotogramas de la simulación dinámica.

A través de la escala de colores se puede apreciar como las vibraciones se acotan a lo largo de la superficie de la calzada, reflejándose y reduciendo su amplitud al alcanzar la acera. En la Figura 5 se muestra la señal de aceleración en el eje vertical evaluada en la posición del acelerómetro superpuesta a la medida de circulación normal del autobús de la Figura 3.

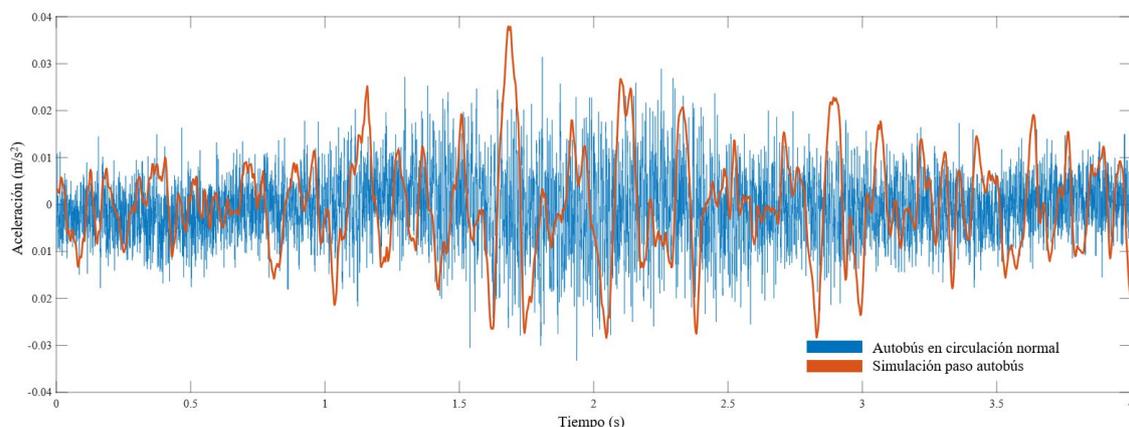


Figura 5: Comparación entre el paso de un autobús medido y simulado.

Aunque es similar el perfil de la amplitud de las señales a lo largo del tiempo, las diferencias en frecuencia son notables. La medida experimental se ha realizado a una frecuencia de muestreo de 2000 Hz mientras que la simulación se ha ejecutado a una frecuencia de 400 Hz. Esta frecuencia de muestreo durante la simulación se ha escogido ya que la percepción de las vibraciones se da a bajas frecuencias: la norma ISO 2631 sobre la evaluación de la exposición humana [21] limita el estudio hasta la frecuencia de 80 Hz, por lo que se ha reducido la frecuencia de simulación para no incrementar el tiempo de cálculo. La señal de la simulación presenta un pico de frecuencias a 5 Hz mientras que la señal medida experimentalmente presenta una frecuencia fundamental en torno a 1 Hz, frecuencia que se corresponde al modo natural habitual de vibración de la masa suspendida de los vehículos.

4. Conclusiones

Este trabajo presenta los primeros avances en el estudio de las vibraciones producidas por el tráfico rodado llevada a cabo por los autores de la Universidad de la República de Uruguay y de la Universidad Miguel Hernández. Para ello se han ejecutado una serie de medidas experimentales que ya permiten arrojar algunas conclusiones:

Los vehículos pesados son los que producen vibraciones más significativas en su entorno, sin embargo, los autobuses eléctricos generan menos niveles de vibración que sus homólogos térmicos, pese a ser más pesados. Este hecho puede deberse a que los vehículos eléctricos son por lo general más modernos con sistemas de suspensión en mejor estado. La presencia de irregularidades en la calzada, como pueden ser baches, resaltos o tapas de registro multiplican la amplitud de las vibraciones. Esta situación ya había sido estudiada por los autores en cuanto a la generación de ruido se refiere [22]. El trabajo actual se centra en ampliar la campaña de medidas y en analizar el espectro de frecuencias de las señales para poder arrojar resultados más concretos.

Por otro lado, está siendo desarrollado un modelo numérico que permita predecir la propagación de las vibraciones generadas en entornos urbanos. Para ello se ha diseñado una geometría variable de forma parametrizada que permite adaptar el modelo a diferentes tipologías de vías, así como simular diferentes vehículos y velocidades de circulación. El modelo actual solo contempla el peso del vehículo como una fuerza constante que se desplaza a lo largo de la calzada, por lo que se está trabajando en incluir la contribución de la dinámica vertical del vehículo como un sistema agrupado masa-muelle sobre el que se le pueda aplicar el perfil de desplazamiento vertical del pavimento para poder simular irregularidades o tener en cuenta la macrotextura del terreno.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a D. Javier Chinchilla Pastor su colaboración en el presente estudio durante la realización de su Trabajo Fin de Grado (TFG) para la obtención del título de Graduado en Ingeniería Mecánica por la Universidad Miguel Hernández de Elche (UMH).

Este TFG participa en el Programa de proyectos docentes de internacionalización en casa PRODIC-UMH del Vicerrectorado de Internacionalización y Cooperación de la UMH, Vicerrectorado al que los autores extienden su agradecimiento.

6. Referencias

- [1] Beben D., Maleska T, Bobra P., Duda J., Anigacz W., “Influence of Traffic-Induced Vibrations on Humans and Residential Building-A Case Study. *Int J Environ Res Public Health*”, *Int. J. Environ. Res. Public Health* **19(9)**, 5441 (2022)
- [2] Watts, G. R., “Traffic induced ground-borne vibration in buildings”, *Transport and Road Research*, Crowthorne (1990)
- [3] Bronkhorst A. J., Moretti D., Geurts C. P. W., “Vibration Threshold Exceedances in the Groningen Building Vibration Monitoring Network”, *Front. Built Environ* **7**, 703247 (2021)
- [4] Clemente P., Rinaldis D., “Protection of a monumental building against traffic-induced vibrations”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **17(5)**, 289-296 (1998)
- [5] Aliyu D. S., Abdulfatah-Abdu Y., Yusuf D. A., “Transmission of Ground Vibration on Road Side Structures”, *Eur. J. Adv. Eng. Technol.* **3**, 43-46 (2016)
- [6] Kowalska-Koczwara A., Rizzo F., Sabbà M. F., Bedon C., “Assessing the Influence of RMS and VDV on Analysis of Human Perception of Vibrations in Buildings Caused by Selected Sources of Traffic”, *Applied Sciences* **14(9)**, 3688 (2024)
- [7] Kowalska-Koczwara A., Pachla F., Burdzik R., “Research on Human Exposure to Transport-Induced Vibration in Buildings”, *Applied Sciences* **14(19)**, 9016 (2024)

- [8] Astrauskas T., Grubliauskas R., “Modelling of Ground Borne Vibration Induced by Road Transport”, *Environmental Protection Engineering* **9**, 376-380 (2017)
- [9] Chilton F., Friesz T., Chen E., “Traffic Induced Vibration”, *54th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D. C. (1975)
- [10] Cebon, A., “Vehicle-Generated Road Damage: A Review”, *Vehicle System Dynamics* **18**, 107-150 (1989).
- [11] Rivas J., Wunderlich R., Heinen S. J., “Road Vibrations as a Source to Detect the Presence and Speed of Vehicles”, *IEEE Sens. J.* **17(2)**, 377-385 (2017)
- [12] Lan J., Lan T., Nahavandi S., “A novel application of a microaccelerometer for target classification”, *IEEE Sens. J.* **4(4)**, 519-524 (2004)
- [13] Kleyko, D., *et al.*, “Vehicle Classification using Road Side Sensors and Feature-free Data Smashing Approach”, *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1988-1993, Rio de Janeiro (2016)
- [14] Eager, D., *et al.*, “City bus seat vibration analysis using 6-axis accelerometer and gyroscope sensors”, *Sci. Rep.* **14**, 29865 (2024)
- [15] Mendes H. G. O., *et al.*, “The Consequences of Mechanical Vibration Exposure on the Lower Back of Bus Drivers: A Systematic Review”, *Applied Sciences* **11(21)**, 9986 (2021)
- [16] Bian X., *et al.*, “A 2.5D finite element approach for predicting ground vibrations generated by vertical track irregularities”, *J. Zhejiang Univ. Sci. A* **12**, 885–894 (2011)
- [17] Zarei Z., Sadeghi J., Sarkar A., “Evaluation of heavy-vehicle-induced vibrations running on asphalt pavements”, *Construction and Building Materials* **358**, 129399 (2022)
- [18] Mhanna M., Sadek M., Shahrour I., “Numerical modeling of traffic-induced ground vibration”, *Computers and Geotechnics* **39**, 116-123 (2012)
- [19] Carmona-Paredes G. J., “Electromovilidad para el transporte público”, *Revista Ciencia* **72(1)**, 18-25 (2021)
- [20] Campello-Vicente H., Peral-Orts R., Campillo-Davo N., Velasco-Sanchez E., “The effect of electric vehicles on urban noise maps”, *Applied Acoustics* **116**, 59-64 (2017).
- [21] ISO Standard 2631-1:2008, “Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 1: Requisitos generales”, International Organization for Standardization, Geneva, 2008
- [22] Fabra-Rodríguez M., Abellán-López D., Simón-Portillo F. J., Campello-Vicente H., Campillo-Davo N., Peral-Orts R., “Numerical model for vibro-acoustics analysis of tyre-road noise generation caused by speed bumps”, *Applied Acoustics* **216**, 109830 (2024)