

ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL PAVIMENTO EN LA DETECTABILIDAD DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

PACS: 43.66.Lj

Poveda-Martínez, Pedro¹; Carbajo-San-Martín, Jesús¹; Ramis-Soriano, Jaime¹; Pérez-Martínez, A. José²

¹Instituto Universitario de Física Aplicada a las Ciencias y las Tecnologías.

Universidad de Alicante.

Carretera San Vicente del Raspeig s/n. 03690 San Vicente del Raspeig, Alicante. España.

Tel.: 965 903 400

Fax.: 965 903 464

²CHM Obras e Infraestructuras.

Avenida de Jean Claude Comaldieu, 03008, Alicante, España.

E-mail: pedro.poveda@ua.es; jramis@ua.es

Palabras Clave: detectabilidad, vehículos, eléctricos, pavimentos, agradabilidad

ABSTRACT

Electric vehicles (EVs) are called to be one of the solutions to reduce the acoustic pollution in urban areas. However, the low noise emitted by these vehicles, especially at low speed regimes, poses a risk to the pedestrians, cyclists and other road users. In these cases, one of the main agents to be considered is the rolling noise, which is influenced by the characteristics of the pavement. In this paper, preliminary results concerning the influence of pavement on the detectability of electric vehicles are presented.

RESUMEN

Los vehículos eléctricos están llamados a ser una de las soluciones para reducir la contaminación acústica en zonas urbanas. Sin embargo, el bajo ruido que éstos generan a bajas velocidades supone un riesgo para la seguridad de peatones, ciclistas y demás usuarios de la vía. En estos casos, uno de los agentes principales a considerar es el ruido de rodadura, estando éste mayormente influenciado por el tipo de pavimento en cuestión. En este trabajo se presentan resultados preliminares relativos a la influencia del pavimento en la detectabilidad de vehículos eléctricos para distintas configuraciones a partir de ensayos psicoacústicos.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las causas principales de contaminación ambiental en entornos urbanos es el tráfico. Los vehículos actúan como agentes emisores de gases contaminantes, empeorando considerablemente la calidad del aire de las ciudades y afectando a la salud de las personas. Asimismo, el progresivo aumento del parque automovilístico ha llevado a la saturación acústica de gran parte de las ciudades. Según la Organización Internacional de Fabricantes de Vehículos [1], en 2016 se vendieron cerca de 17 millones de vehículos de pasajeros en la Unión Europea, 11 millones en América y 39 millones en Asia. Según un informe de la Organización Mundial de la Salud [2], el ruido es el causante de un gran número de muertes al año debido a patologías derivadas del mismo tales como problemas de corazón o reducción de la calidad del sueño.

Las administraciones han comenzado a abordar este problema con soluciones de distinta índole, como la restricción temporal del tráfico, la reducción de la velocidad o la peatonalización definitiva de determinadas zonas de la ciudad. Un claro ejemplo se encuentra en grandes

ciudades como Madrid, Berlín o Nueva York, con diferentes proyectos de peatonalización en marcha. Del mismo modo, ciudades como Barcelona están desarrollando el concepto de supermanzanas, espacios urbanos donde el peatón y el ciclista ganan terreno en detrimento de los vehículos motorizados. Sin embargo, la gran apuesta mundial para la reducción de gases contaminantes radica en la sustitución progresiva de los vehículos de combustión interna (ICEV) por vehículos eléctricos (EV). De acuerdo con la Natural Resources Defense Council [3], los EV son una parte fundamental para el futuro, ya que disminuyen la emisión de gases contaminantes y contribuyen a frenar el cambio climático. Sin embargo, los vehículos eléctricos presentan un inconveniente. La ausencia de motor de combustión interna hace que estos vehículos se comporten de forma muy silenciosa, especialmente a bajas velocidades [4, 5]. Esto supone un riesgo añadido para peatones y ciclistas, y especialmente para aquellas personas más vulnerables como niños, ancianos o invidentes [6, 7]. En la mayoría de los casos, la percepción sonora del vehículo sirve como mecanismo adicional de alerta, por lo que la ausencia de ruido puede derivar en un aumento del número de accidentes [8].

Para solucionar el problema de los vehículos silenciosos, distintos países han adoptado como medida la instalación de un sistema acústico de alerta (AVAS) en los EV. El dispositivo consiste en una fuente de emisión de ruido que permanece activa durante la circulación del vehículo a velocidades inferiores a 30 km/h. El objetivo es proporcionar una señal acústica de cara al peatón de forma que le indique en todo momento de la presencia del vehículo. Para regular el uso de este tipo de dispositivos, se han desarrollado diferentes normativas que establecen las características básicas del ruido a emitir [9, 10, 11]. El uso de sistemas de advertencia (WS) se ha estudiado en numerosos trabajos. K. Yamauchi en [12], compara el nivel de presión sonora al cual se detectan diferentes WS según el entorno urbano. A su vez, E. Parizet et al. en [13] estudia la detectabilidad de diferentes sonidos obteniendo el tiempo de reacción del peatón a partir de ensayos auditivos. Estos trabajos ponen de manifiesto la validez del AVAS como medida de seguridad para peatones y ciclistas.

Existen sin embargo medidas alternativas que podrían solventar la ausencia de ruido en el vehículo para aquellas situaciones donde realmente existe un riesgo para el peatón o el ciclista. Escenarios como la salida de garajes, proximidades de pasos de peatones y semáforos, los cruces de calles, o incluso vías secundarias con carril bici, pueden tratarse de manera más concreta y encontrar una configuración que se ajuste a las necesidades de cada caso. Una solución alternativa pasaría por modificar el pavimento utilizado en las zonas de riesgo para mejorar la detectabilidad del vehículo. En este caso, el ruido de rodadura actuaría como sonido de advertencia para el peatón. Sandberg et al. en [14] hace un análisis muy exhaustivo del ruido producido por la interacción entre neumático y pavimento. Tal y como indica el autor, la gran mayoría de vehículos utiliza neumáticos similares, cosa que no ocurre con el pavimento de las ciudades. Uno de los factores que más influye en la generación de ruido de rodadura es la textura superficial del firme. Modelos estadísticos del ruido neumático/calzada como el de Sandberg-Desconnet [14], o híbridos como SPERoN [15] y HyRoNE [16], incluyen dicho parámetro en sus cálculos. Por tanto, una modificación de las características del pavimento sobre el que circula el vehículo podría mejorar la detectabilidad del mismo.

En este trabajo se muestra un estudio preliminar del efecto de diferentes pavimentos sobre la detectabilidad del vehículo. En primer lugar, se muestran algunas configuraciones de pavimentos que podrían resultar eficaces a la hora de generar ruido. Tres de ellas fueron seleccionadas para formar parte del estudio. Posteriormente se describe el proceso seguido para la adquisición de muestras sonoras correspondientes a la rodadura de un vehículo. Seguidamente se detalla el método, a emplear en una fase posterior del proyecto, para realizar los ensayos auditivos con el fin de establecer la detectabilidad de cada uno de los pavimentos seleccionados. Para finalizar, se exponen los resultados obtenidos del análisis acústico de los diferentes pavimentos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. Descripción de diferentes configuraciones de pavimento. Estímulos acústicos.

A principios del siglo XX, las zonas urbanas se pavimentaban tradicionalmente con suelo adoquinado o empedrado. Esta es una tradición que hoy en día sigue existiendo en numerosas ciudades del norte de Europa. Sin embargo, a mediados de siglo, países como España fueron sustituyendo este tipo de pavimentos por asfalto debido a su menor coste y tiempo de ejecución. Hoy en día se pueden encontrar multitud de configuraciones de firmes. Respecto a suelos adoquinados existen diferentes materiales, tamaños y disposiciones del adoquín (figura 1a). En cuanto a suelos de piedra (figura 1b), el tamaño y cantidad de árido, la prominencia o la disposición en un área son algunas de las variaciones que se observan. Respecto a los pavimentos asfálticos (figuras 1c), existen multitud de tipologías, muchas de ellas normalizadas, cuya caracterización depende tanto del tamaño de árido como del ligante utilizado o la textura superficial seleccionada (macrotextura positiva o negativa).

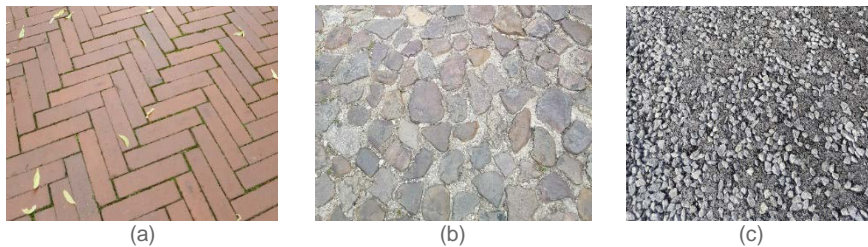


Figura 1. Diferentes configuraciones de pavimento que se pueden encontrar en suelo urbano.

Este tipo de pavimentos pueden utilizarse en situaciones específicas con el objetivo de generar vibraciones en el vehículo y alertar al conductor, o bien emitir un nivel de presión sonora determinado que sirva de aviso para peatones y ciclistas. Un ejemplo claro es la configuración utilizada en las líneas del arcén en vías de circulación. La utilización de macrotexturas positivas por adición de material o bien las macrotexturas negativas por el fresado del pavimento (figura 2a) pueden emplearse para indicar al conductor los límites de la calzada. Igualmente, la variación del tipo de pavimento en zonas de cruce de calles puede suponer una solución a la ausencia de ruido de los EVs en zonas residenciales (ver figura 2b).



Figura 2. Configuraciones de pavimento empleadas por razones de seguridad. (a) macrotextura negativa en carretera secundaria para delimitación de arcen. (b) superficie adoquinada en cruce de calles.

Para la realización de este trabajo se seleccionaron cuatro pavimentos con distinta configuración. El primero de ellos correspondió a un suelo formado por adoquines de tamaño 8x17 cm y una separación de 2 cm entre ellos (figura 3a). En segundo lugar, se realizaron medidas sobre una zona de piedras de tamaño medio 1 cm (ver figura 3b). En tercer lugar, se seleccionó un firme de cemento liso (figura 3c), muy habitual en zonas de estacionamiento privado de vehículos. Por último, y con el objetivo de comparar el resto de pavimentos con un firme estándar, se llevaron a cabo medidas sobre un asfalto convencional G20+S20 (ver figura 3d).



(a) (b) (c) (d)

Figura 3. Pavimentos seleccionados para el estudio de la detectabilidad.

2.2. Configuración para la de adquisición de muestras sonoras.

En la actualidad existen diferentes métodos normativos para cuantificar el efecto del pavimento en el ruido de tráfico. Uno de estos métodos es el denominado *Statistical Pass-by* (SPB) [17], en el cual se hace uso de un sonómetro y un tacómetro para establecer el nivel de presión sonora generado por los vehículos que circulan por la zona de interés. Otro método muy extendido es el Close Proximity (CPX) [17]. En este caso, el vehículo o remolque se dota de un neumático de referencia. Mediante un soporte adherido al vehículo y dos micrófonos, se obtiene el nivel de ruido producido por la interacción entre neumático y calzada en puntos muy cercanos a la zona de contacto. Otro sistema menos extendido es el *On-Board Sound Intensity* (OBSI) [18]. Este método consiste en una variación del CPX y sustituye los micrófonos por sondas de intensidad. De esta forma, el patrón directivo formado por los dos transductores en fase permite evitar la influencia de fuentes de ruidos no deseadas focalizando el haz en un área de interés.

Los métodos indicados anteriormente están diseñados para vehículos con una velocidad mínima de 50 km/h, mientras que la ausencia de ruido en vehículos eléctricos tiene lugar a velocidades bajas, especialmente por debajo de 30 km/h. Por este motivo, la caracterización del ruido generado por los diferentes pavimentos se llevó a cabo por medio de una simplificación de los métodos CPX y OBSI de una sonda. Para ello, se desarrolló un sistema de medida capaz de acoplarse a la llanta del vehículo y posicionar los transductores según las necesidades de cada ensayo. Para las medidas realizadas por el método CPX simplificado, se emplearon dos micrófonos situados a una altura de 10 cm del suelo, 20 cm del eje de la rueda y una separación del vehículo de 15 cm (ver figura 4a). Mediante este montaje se realizó la caracterización del ruido en términos de niveles de presión sonora, así como la adquisición de muestras sonoras para la realización de ensayos auditivos. En un segundo ensayo se empleó el método OBSI de una sonda para caracterizar el ruido de rodadura según la intensidad sonora generada. En este caso la sonda se situó a 10 centímetros del suelo y a una distancia de 15 cm del vehículo tal y como se detalla en la figura 4b. Todas las medidas se realizaron con el mismo neumático montado sobre un vehículo Volkswagen Golf.



(a)



(b)

Figura 4. Montaje del equipo de medida en vehículo ligero. (a) medidas de micrófono para método CPX. (b) medidas de sonda de intensidad sonora método OBSI.

En todos los casos, el motor del vehículo se apagó durante la realización de las medidas, evitando así su aparición en las señales adquiridas. Las medidas se llevaron a cabo durante un

periodo temporal de 5 segundos,

considerándose la velocidad del vehículo constante en el tramo ensayado. Para cada uno de los pavimentos analizados se realizaron medidas a diferentes velocidades en función de la longitud del tramo disponible.

2.3. Procedimiento para realizar los ensayos de detectabilidad.

Para establecer el nivel de detectabilidad de las diferentes configuraciones de pavimento, se desarrolló una aplicación que permitirá al oyente establecer, mediante un control tipo *scroll*, el nivel de señal a partir del cual perciba el ruido de rodadura de manera clara. A partir de este nivel, se calculará la distancia a la que estaría el vehículo en el momento de la detección. Los ensayos se realizarán con las muestras sonoras correspondientes a los vehículos circulando a 10 km/h. Al comienzo del test se explicará a cada oyente el procedimiento de ensayo, mostrándoles los sonidos a evaluar para familiarizarse con ellos. Con objeto de recrear el ambiente sonoro de un entorno urbano, se incluye a lo largo del ensayo un ruido de fondo constante de nivel 56 dB(A). Los sonidos se presentarán al oyente de forma aleatoria con un total de tres iteraciones por muestra. Los ensayos se realizarán en una sala de laboratorio con poco ruido, empleando unos auriculares AKG K612Pro conectados a una tarjeta de sonido TASCAM 144MKII.

2.4. Procedimiento para el estudio de la molestia causada por el ruido generado por el pavimento.

La molestia causada por el ruido de rodadura de los distintos pavimentos se analizará por medio de un ensayo auditivo mediante el método de comparación de parejas. Los ensayos se realizarán de nuevo en una sala de laboratorio empleando auriculares. Al inicio del ensayo se describirá el procedimiento a cada participante, mostrándoles nuevamente los sonidos a valorar. Seguidamente, comenzará la evaluación de las muestras sonoras. Los estímulos se presentarán al oyente por parejas, debiendo evaluarlos de acuerdo con la pregunta “¿Qué sonido le parece más agradable?” y seleccionando entre las respuestas: A más agradable que B; B más agradable que A; A igual de agradable que B. A partir de las respuestas del oyente se confeccionará una matriz de preferencias que permita describir el grado de molestia causado por el ruido de rodadura.

3. RESULTADOS

3.1. Análisis del ruido generado por la interacción neumático-calzada para las configuraciones de pavimento seleccionadas.

El análisis de las señales obtenidas por medio de la configuración CPX muestra un aumento significativo en el nivel de presión sonora generado por la interacción entre neumático y calzada de los distintos pavimentos al incrementar la velocidad del vehículo (ver tabla 1). Los resultados indican que para el asfalto, adoquín y piedra no existe una diferencia significativa de nivel. Por el contrario, el ruido producido en el suelo tipo cemento supone entre 5 y 8 dB menos que el resto de firmes. Cabe pensar que la detectabilidad del vehículo en este caso será sensiblemente inferior y por tanto, aumentará el riesgo para el peatón.

Algunas de los pavimentos ensayados presentan ciertas particularidades en su composición espectral (figura 6). Así, el suelo compuesto por piedras muestra un nivel superior a alta frecuencia. Este fenómeno se debe al tamaño del árido empleado. Pavimentos con una rugosidad inferior de la superficie, como el cemento o el asfalto estándar, tienen un contenido menor de alta frecuencia. Cabe destacar la aparición de componentes tonales de mayor amplitud en el pavimento adoquinado. Estas frecuencias están directamente relacionadas con

el tamaño del adoquín, desplazándose a frecuencias superiores a medida que se incrementa la velocidad del vehículo (ver figura 7).

Tabla 1. Niveles de presión sonora, dB(A), del ruido de rodadura de los diferentes pavimentos analizados

Pavimento	10 km/h	20 km/h
Asfalto	75	82
Adoquines	73	82
Piedra	76	81
Cemento	68	75

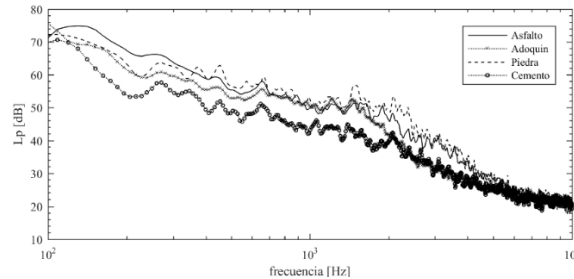


Figura 6. Espectro de frecuencias de los diferentes pavimentos estudiados.

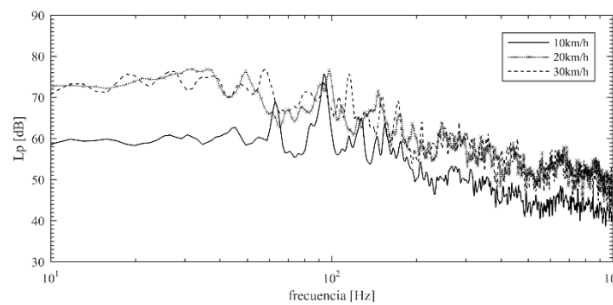


Figura 7. Espectro de frecuencias del ruido generado por la rodadura del vehículo a diferentes velocidades en pavimento adoquinado.

Tal y como sucedía con el nivel de presión sonora, los resultados obtenidos mediante el método OBSI muestran un aumento del nivel de intensidad sonora con la velocidad. Este fenómeno, cuyo comportamiento presenta una tendencia logarítmica, se repite para todos los pavimentos analizados (ver figura 8).

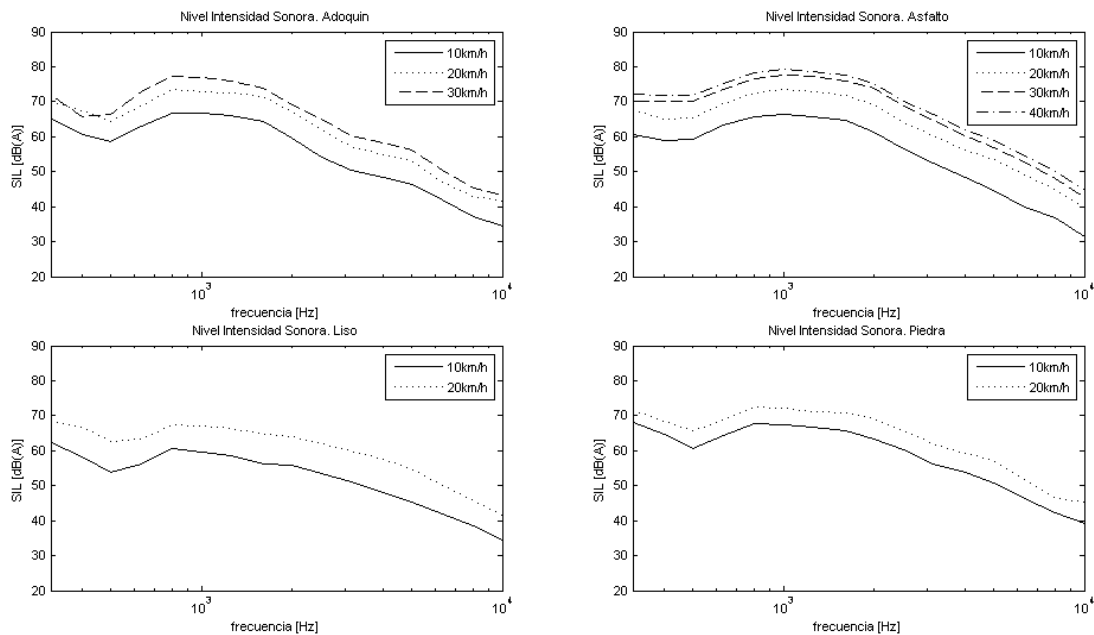


Figura 8. Nivel de intensidad sonora para los diferentes pavimentos estudiados.

Al realizar una comparación del contenido espectral de la intensidad sonora, se observa nuevamente un nivel superior de alta frecuencia para el pavimento compuesto por piedras de

pequeño tamaño. Esta característica es destacable a 10 km/h, sin embargo, a 20 km/h la diferencia respecto al resto de muestras disminuye considerablemente (ver figura 9).

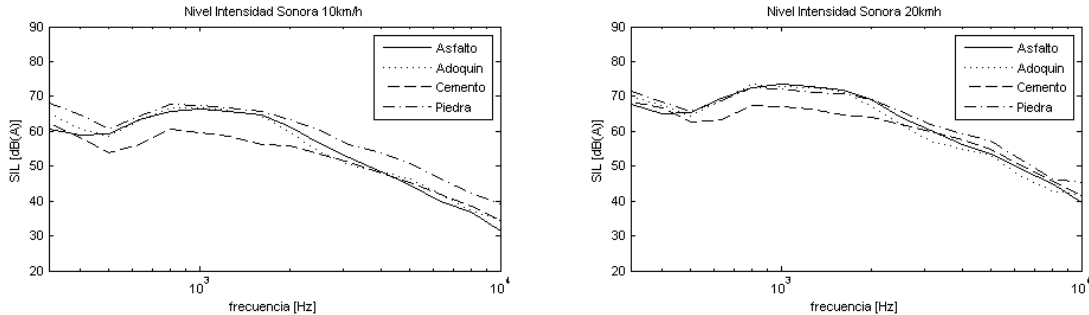


Figura 9. Nivel de intensidad sonora para los diferentes pavimentos estudiados.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados expuestos en el apartado anterior, el nivel de presión e intensidad correspondiente al ruido de rodadura presenta una relación directa con la velocidad del vehículo. Para las configuraciones de asfalto, adoquines y piedra, los niveles toman valores muy similares, mientras que para los suelos de cemento liso, por sus características superficiales, los valores resultan sensiblemente inferiores.

Atendiendo al análisis frecuencial, se parecía una relación entre las características físicas del pavimento y el contenido espectral del ruido generado por el pavimento. Este fenómeno resulta más evidente para aquellas configuraciones con macrotextura positiva o negativa, como son el caso de suelos adoquinados o con piedras. En el primer caso, el contacto neumático calzada da lugar a la aparición de componentes tonales relacionadas con el tamaño del ladrillo. La frecuencia de dichas componentes varía en función de la velocidad del vehículo. Del mismo modo, para la configuración de piedras, se observa un contenido espectral de alta frecuencia superior al del resto de pavimentos. Este efecto se debe al tamaño de la árido y se hace notable a velocidades muy bajas.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto diferencias en el ruido generado por los pavimentos analizados. Cabría esperar que dichas variaciones afectarían de alguna manera a la detectabilidad. Tanto la detectabilidad de los pavimentos analizados como la molestia sonora causada por la rodadura se estudiarán en trabajos posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias a CHM Obras e Infraestructuras, a través del proyecto “Firmes con alerta acústica para vehículos eléctricos” IDI-20151050, financiado por el Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial (CDTI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del Programa Operativo Pluriregional de Crecimiento Inteligente.

REFERENCIAS

- [1] Organización Internacional de Constructores de Automóviles. Página web consultada 01/09/2017.
- [2] Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. OMS.
- [3] Electric Power Research Institute, NRDC. Environmental Assessment of Full Electric Transportation Portfolio: Executive Summary. Sep 17, 2015.

- [4] Old I., Kaliski K., Blomberg L. Sound emissions from a plug-in electric vehicle. In: Proc. Internoise, New York; 2012.
- [5] Cai. C. Noise emission from electric cars. Master's thesis. Department of Electrical Engineering. Acoustic Technology (ACT). Technical University of Denmark. Kgs. Lyngby, Denmark. July, 2012.
- [6] Garay-Vega L., Hastings A., Pollard J., Zuschlag M., Stearns M. Quieter cars and the safety of blind pedestrians: Phase I, report DOT HS 811 304, Tech.rep., National Highway Traffic Safety Administration, U.S. Department of Transportation, April; 2010.
- [7] Altinsoy E. The detectability of conventional, hybrid and electric vehicles sounds by sighted, visually impaired and blind pedestrians. In: Proc. Internoise, Innsbruck; 2013.
- [8] NHTSA, "Incidence of Pedestrian and Bicyclist Crashes by Hybrid Electric Passenger Vehicles". Technical Report. September 2009. Surname, N.. "Title of the publication". Journal title, Volume, year, pages.
- [9] Dalrymple G. Minimum sound requirements for hybrid and electric vehicles, Tech. Rep. NHTSA-2011-0148, National Highway Traffic Safety Administration; 2011.
- [10] T. Ministry of Land, Infrastructure, Tourism. Japanese activities on approaching vehicle audible system for HEVs and EVs. Tech. rep., may 4th; 2010.
- [11] Roudard I. Proposal for a European parliament and council regulation on community design (94/c 29/02) COM (93) 342 final - COD 463 (submitted by the commission on 3.12.93) proposal for a European parliament and council directive on the legal protection of designs (93/c 345/09) COM (93) 344 final - COD 464, Computer Law & Security Review 10 (1994) 26-31, COM (2011) 856. doi:10.1016/0267-3649(94)90135-x.
- [12] Yamauchi K., Menzel D., Takada M., Nagahata K., Ichiro Iwamiya S., Fastl H. Psychoacoustic examination of feasible level of additional warning sound for quiet vehicles. Acoust. Sci. & Tech. 36, 2, 2015, p. 120-125. doi:10.1250/ast.36.120.
- [13] Parizet E., Ellermeier W., Robart R. Auditory warnings for electric vehicles: Detectability in normal-vision and visually-impaired listeners. Applied Acoustics 86, 2014, p. 50-58. doi:10.1016/j.apacoust.2014.05.006.
- [14] Ulf Sandberg, Jerzy A. Ejsmont. Tyre/Road Noise Reference Book. Ed. Informex, 2002.
- [15] F. Anfosso-Lédée, Y. Pichaud, J.F. Le Fur. DEUFRAKO project P2RN – report on acoustic measurements, performed on LCPC Test Track in Nantes in June 2006. Technical report LCPC 13M06151, June 2007
- [16] P. Klein, J.F. Hamet, "Tyre/road noise prediction with the HyRoNE model", Proceedings of INTER-NOISE conference, Istanbul, Turkey, 2007.
- [17] ISO 11819-4. Acoustics – Methods for measuring the influence of road Surface on traffic noise.
- [18] AASHTO TP 76-10. Standard method of test for measurement of tire/pavement noise using the On Board Sound Intensity (OBSI) Method. American Association of State and Highway Transportation. 2010.