

## EVOLUCIÓN DEL RUIDO DE RODADURA PRODUCIDO EN UN TRAMO EXPERIMENTAL CON ALTO CONTENIDO EN POLVO DE CAUCHO

PACS: 43.50.Lj

Fernández Vázquez, Victoriano; Terán Sierra, Fernando J.; Huertas Gallardo, Pedro y Expósito Paje, Santiago.

Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil. Universidad de Castilla-La Mancha.

Avda. Camilo José Cela s/n

13071 Ciudad Real, España

Tel: 926 295300

E-mail: Victoriano.fernandez@uclm.es

### ABSTRACT

Crumb rubber powder from recycled tires is widely employed in the construction of new roads in Spain, since this material, used under the right conditions, could improve the mechanical characteristics of bituminous mixtures. On the other hand, its usage could also improve some of its functional characteristics, such as the attenuation of the noise produced at tire/road interaction, although the noise reduction decreases at middle term. This work aims to study the middle-term evolution of tire/road noise of an experimental test track section built with a high content of crumb rubber powder.

### RESUMEN

La incorporación de polvo de caucho proveniente del triturado de neumáticos fuera de uso es una técnica habitual en la construcción de carreteras en España, ya que este aditivo, empleado en las condiciones adecuadas, puede mejorar las características estructurales de las mezclas bituminosas. Por otro lado, su empleo también puede mejorar algunas de sus características funcionales, como el ruido de rodadura, aunque esta mejora se atenúa a medio plazo. En este trabajo se estudia la evolución temporal del ruido de rodadura de un tramo experimental de carretera construido con la incorporación de un alto porcentaje de polvo de caucho.

### INTRODUCCION

El ruido ambiental es uno de los principales problemas con los que se encuentran las sociedades modernas. Actualmente, gracias a los eficientes sistemas de recogida y tratamiento de residuos, los desechos sólidos y líquidos de los núcleos urbanos son depositados, separados y tratados de manera eficiente sin que supongan, en condiciones generales, problemas para los ciudadanos. Sin embargo, existen otros tipos de contaminación, menos visibles por su naturaleza

pero igualmente contaminantes, que perjudican la salud de aquellos que los sufren. Este es el caso de los contaminantes que se desplazan por el aire. Dentro de este grupo están los contaminantes en estado gaseoso, como los gases de efecto invernadero o los NOx provenientes de la combustión en los motores diésel. Dentro de este grupo también podemos encontrarnos con la contaminación acústica. La contaminación acústica es un tipo de polución muy dañino, que puede tener repercusiones graves en la salud de las personas afectadas [1], especialmente aquellas que están expuestas a altos niveles de ruido a lo largo del día. Es por ello que desde hace años, tanto desde la Comunidad Europea como desde los gobiernos de los distintos países miembros ha surgido un marco normativo con el objetivo de establecer límites máximos de emisión sonora y planes de acción para combatir este tipo de contaminación [2, 3].

Uno de los principales responsables de los altos niveles de ruido en los espacios urbanos es el tráfico rodado que circula por la red de carreteras, debido tanto al volumen de vehículos como a la inserción de las grandes vías de comunicación en el interior de los núcleos urbanos. Es evidente que las infraestructuras de transporte deben satisfacer las demandas de la población; es decir, la rapidez de las comunicaciones entre distintos puntos de la geografía, pero a su vez pueden originar un deterioro notable de la calidad de vida tanto de los usuarios como de los que no lo son, debido a los niveles de ruido generados (contaminación acústica).

Es una de las obligaciones de las autoridades locales, regionales y nacionales combatir la contaminación acústica con las medidas más adecuadas en cada caso. En este sentido, son varias las medidas posibles en función de los condicionantes económicos o técnicos. Algunas de estas medidas se indican a continuación [4]:

- Gestión del tráfico.
- Reducción de la velocidad de circulación.
- Fomento del transporte público
- Disposición de barreras acústicas
- Soterramiento de las vías de comunicación
- Disposición de mezclas de baja emisión sonora (mezclas sono-reductoras).

En cada uno de los casos, las autoridades competentes se decidirán por una u otra medida. Sin embargo, solo las tres últimas medidas permiten mantener el servicio (misma intensidad de vehículos) reduciendo las afecciones. Además, la última medida es la única que combate la contaminación acústica actuando en el origen de la misma (interacción neumático/pavimento).

Es cierto que el movimiento de los vehículos a motor produce emisiones sonoras que se originan en distintos puntos. Para un caso típico podemos distinguir entre el ruido generado por las partes móviles del vehículo (ruido motor, caja de cambios, admisión y expulsión de gases), el ruido aerodinámico (interacción de la masa de aire con la superficie de la carrocería), y el ruido de rodadura, producido por la interacción entre los neumáticos y la superficie de la carretera [5].

Para la mayor parte de los turismos, especialmente los más modernos, el ruido de rodadura predomina sobre el resto de fuentes para velocidades de circulación superiores a 40 km/h. Es decir, para las velocidades de circulación habituales en las vías interurbanas y gran parte de las vías urbanas. Este es el caso de vías rápidas y carreteras de circunvalación de los núcleos urbanos, donde existe un problema real de ruido sobre la población debido a la cercanía de las viviendas a la carretera.

Dada la importancia de las mezclas de baja emisión sonora y su desarrollo, en este trabajo de investigación nos centraremos en el estudio de un tramo experimental construido con una mezcla bituminosa discontinua (BBTM) con betún con alto contenido en polvo de caucho (CRMB). Este tipo de mezclas podrían ser consideradas como sono-reductoras, y emplearse como medida de atenuación de ruido en los casos donde se considere oportuno. Por otro lado, el empleo de este

tipo de mezclas supone un menor coste económico respecto a otras de las mezclas consideradas como sono-reductoras: Las mezclas dobles porosas; y a diferencia de estas últimas no sufren problemas de colmatación de huecos con la consecuente reducción de su capacidad mitigadora del ruido. Los datos de la mezcla experimental se compararán con los obtenidos de un tramo de referencia construido con una mezcla de similares características pero sin polvo de caucho (Ref).

## TÉCNICAS EXPERIMENTALES

### Tiresonic Mk4-LA<sup>2</sup>IC

Equipo compuesto por una cámara semianecoica en el interior de la cual se dispone un neumático de referencia y dos micrófonos a distancia y ángulo determinado con respecto al neumático [6]. Gracias a la cámara semianecoica, el equipo puede registrar el ruido producido en la interacción neumático/pavimento sin que las medidas se vean alteradas por el registro de otros ruidos externos (ruido por viento, por el vehículo tractor, por otros vehículos circulando en las inmediaciones...), ya que las mediciones se realizan en condiciones reales de circulación.

### LaserDynamicPG-LA<sup>2</sup>IC

Equipo compuesto por un perfilómetro láser para el registro del perfil longitudinal de la carretera y la determinación de parámetros de caracterización superficial de la misma como son la MPD (Mean Profile Depth; caracterización de la macrotextura) y el IRI (International Roughness Index; Regularidad superficial) [7]. La textura superficial de la capa de rodadura es una de las principales responsables del nivel sonoro generado en la interacción neumático/pavimento. Su importancia es aún mayor en las bajas frecuencias y está relacionada con el ruido producido por impactos y vibraciones del neumático [8].

Tanto el equipo Tiresonic Mk4-LA<sup>2</sup>IC como el LaserDynamicPG-LA<sup>2</sup>IC realizan la toma de datos georeferenciada (coordenadas GPS). Con el objetivo de caracterizar la misma trayectoria sobre la vía auscultada. El perfilómetro láser se coloca en la parte frontal del vehículo, mientras que la cámara semianecoica se ubica en la parte trasera del mismo (Fig. 1a).

### Rigidez dinámica

El equipo para la determinación de la rigidez dinámica está compuesto por un excitador de vibraciones y una cabeza de impedancia. El equipo registra simultáneamente la fuerza con la que se solicita la superficie estudiada y la respuesta en movimiento de la misma. El equipo se fija sobre la superficie que se desea estudiar y se determina el espectro de rigidez dinámica, el cual es característico de cada estructura [9] (Fig. 1b).

La rigidez dinámica puede tener influencia en las medias frecuencias del espectro de emisión sonora del ruido de rodadura, es decir, en las bandas del espectro donde se registran los mayores valores. Sin embargo, para que se produzca una reducción considerable del ruido de rodadura por efecto de la rigidez dinámica, esta debe reducirse notablemente [10].

### Tubo de impedancia

Este equipo permite la determinación de los espectros del coeficiente de absorción sonora de los materiales estudiados, en este caso mezclas bituminosas. El intervalo de frecuencias estudiado con este equipo está comprendido entre 50 Hz y 1,6 kHz [11] (Fig. 1c).

La absorción acústica puede llegar a tener gran importancia en la mitigación del ruido producido en pavimentos porosos, sin embargo, su importancia es menor en superficies cerradas como la que presentan los materiales estudiados en este trabajo (mezclas discontinuas BBTM).

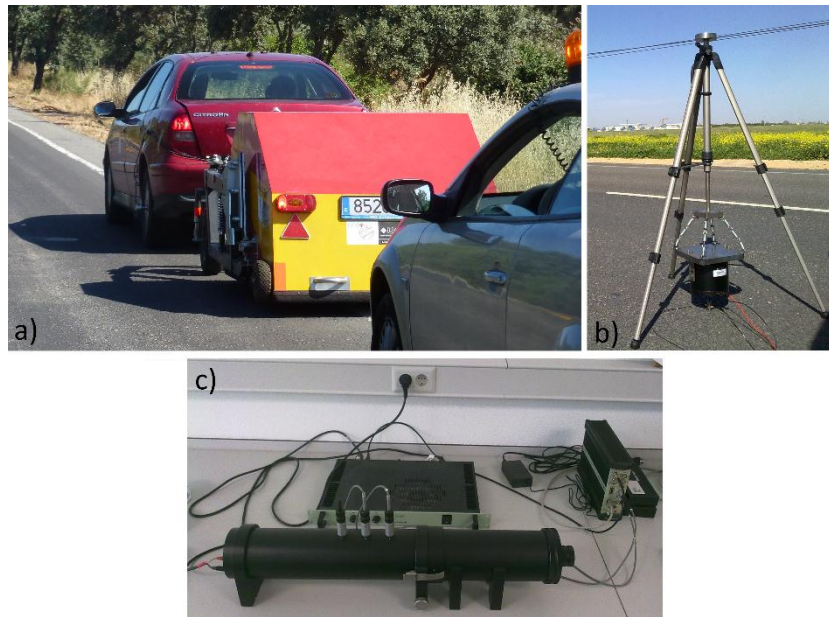


Fig. 1. Equipos empleados en la auscultación: a) Tiresonic MK4-LA<sup>2</sup>IC, b) excitador de vibraciones y c) tubo de Kundt

## SECCIÓN EXPERIMENTAL: MATERIALES

La sección experimental que se ha estudiado (Fig. 2) está compuesta por una mezcla discontinua BBTM 11A con alto contenido en polvo de caucho (20% sobre el contenido de ligante). El polvo de caucho ha sido añadido por vía húmeda, es decir, se ha añadido y mezclado con el ligante caliente hasta su completa digestión. Junto a la sección experimental se ha extendido una mezcla tipo BBTM 11A con betún convencional (sin polvo de caucho) con el fin de evaluar la influencia del betún con alto contenido en polvo de caucho sobre los resultados de emisión sonora de ambas mezclas.

Se han realizado dos campañas de auscultación, la primera a los dos meses de la construcción de la carretera (+0), y la segunda a los tres años (+3). Con estas campañas se pretende estudiar el comportamiento acústico y superficial de estas dos mezclas, sometidas a las mismas condiciones climatológicas y al mismo volumen de tráfico durante todo el periodo en servicio.

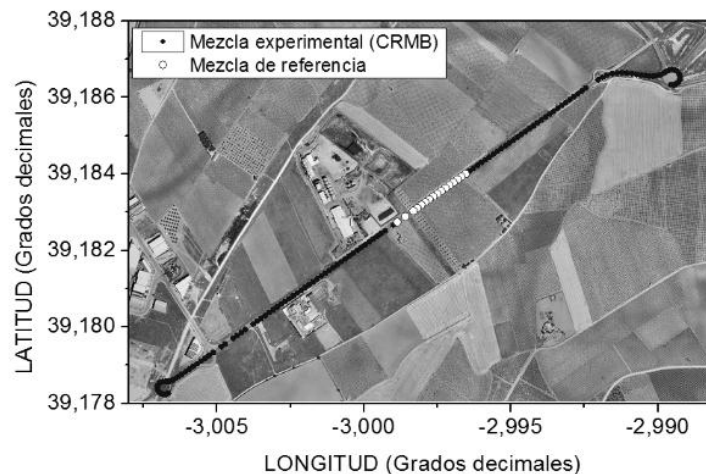


Fig. 2. Localización GPS de los tramos estudiados



## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Ruido de rodadura

Se han realizado medidas del nivel sonoro producido en la interacción entre el neumático y el pavimento en dos campañas de auscultación, con un intervalo entre ellas de tres años. Estas medidas permitirán evaluar la evolución del comportamiento acústico de las mezclas a corto plazo y el efecto de emplear una mezcla con alto contenido en polvo de caucho.

La Fig. 3a muestra la relación entre nivel sonoro, velocidad y frecuencia en el caso de la mezcla experimental con alto contenido en polvo de caucho. Como se aprecia en la figura, el mayor incremento del nivel de ruido con la velocidad se produce en el entorno de medias frecuencias. Considerando los valores globales de intensidad sonora, la relación entre velocidad y nivel sonoro se muestra en la Fig. 3b.

Para el estudio de la evolución temporal del nivel sonoro (entre la primera y la segunda campaña de auscultación) se han comparado los espectros de emisión sonora, considerando las variaciones entre ellos (Fig. 4). En esta figura se muestra el intervalo de frecuencia en el que se obtienen los mayores niveles de intensidad sonora, es decir, entre 300 Hz y 5 kHz. Los niveles se han corregido por velocidad (50 km/h) y por temperatura (20 °C). Los valores globales del nivel de intensidad sonora ( $L_{CPtr,50 \text{ km/h y } 20 \text{ °C}}$ ) que se han registrado en la primera campaña son 88,7 dB(A) y 90,5 dB(A) respectivamente para la mezcla de experimental y la de referencia, mientras que en la segunda campaña estos valores fueron 89,2 dB(A) y 90,5 dB(A) respectivamente para la mezcla de experimental y la de referencia.

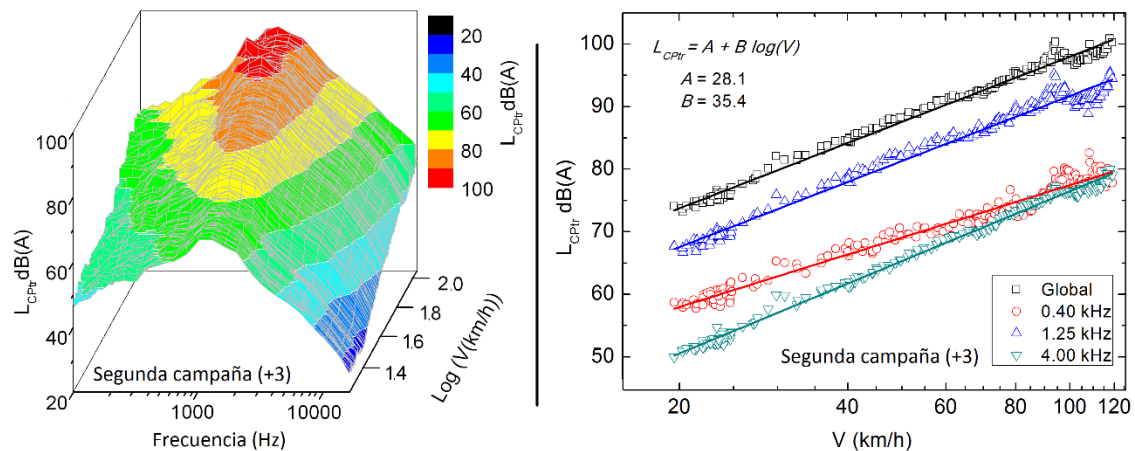


Fig. 3. a) Espectro de emisión sonora en función de la velocidad. b) Dependencia con respecto a la velocidad del nivel sonoro global y de algunas bandas del espectro de emisión.

En la Fig. 4a se observa la comparación entre los espectros obtenidos en la primera campaña de auscultación (+0), de la mezcla bituminosa con alto contenido en polvo de caucho (CRMB) y de la mezcla de referencia (Ref.). En esta figura se aprecia como las mayores reducciones de ruido de rodadura se producen en el entorno de las medias frecuencias (700 – 2000 Hz). Estas frecuencias son de gran interés, pues es en este intervalo donde se obtienen los mayores valores de emisión sonora por interacción neumático/pavimento. Sin embargo, a pesar de que este intervalo es el de mayor importancia en la generación global de ruido de rodadura, no existe un mecanismo de generación de ruido al que se le pueda atribuir una relevancia predominante sobre el resto de mecanismos en la producción de ruido. Se considera que en este intervalo tienen influencia, de distinta manera, distintos mecanismos de generación como la textura, la rigidez dinámica o la absorción sonora.

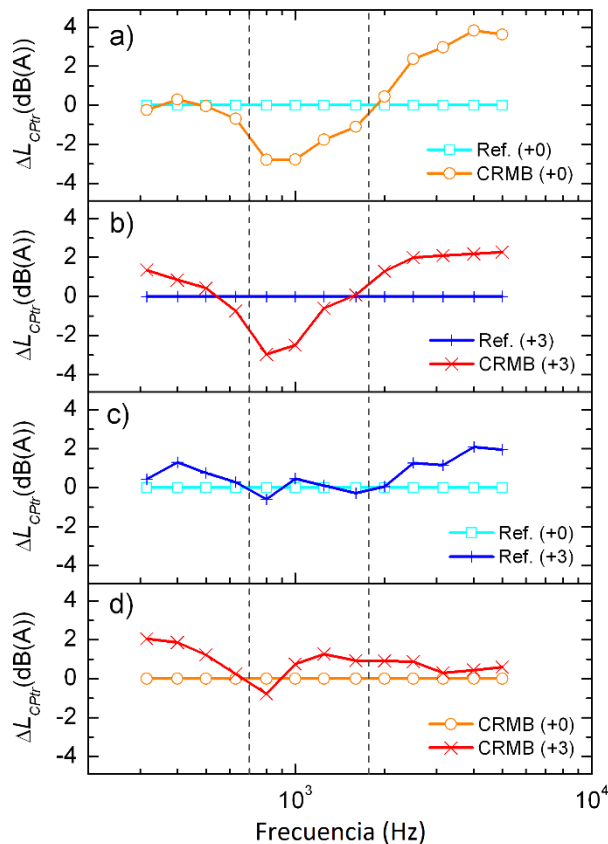


Fig. 4. Espectro sonoro relativo entre: a) Mezcla experimental y referencia (primera campaña), b) Mezcla experimental y referencia (segunda campaña), c) Primera y segunda campaña (mezcla de referencia y d) Primera y segunda campaña (mezcla experimental).

En la Fig. 4a también se aprecia como los niveles de ruido a bajas frecuencias son similares, estas frecuencias se relacionan con el nivel de macrotectura (MPD) que presenta la capa de rodadura, y que será estudiada en los siguientes apartados de este trabajo. Por último, llama la atención que en la zona de altas frecuencias el nivel de intensidad sonora sea mayor en la mezcla con polvo de caucho que en la mezcla de referencia. Este comportamiento podría deberse a diferencias en la absorción sonora o en la propagación y reflexiones en el ruido generado.

La Fig. 4b muestra la comparación de la mezcla experimental y la de referencia en la segunda campaña de auscultación (+3). A primera vista se aprecian similitudes entre la primera y la segunda campaña, pero son las diferencias entre ellas las que tienen mayor interés en el estudio de la evolución temporal del ruido de rodadura. Como puede apreciarse, las diferencias entre ambas mezclas se han atenuado a lo largo del tiempo, como producto del deterioro de la mezcla a medio plazo. En el entorno de las medias frecuencias la mezcla con polvo de caucho (CRMB) sigue siendo menos ruidosa aunque las diferencias se han eliminado completamente en alguna de las bandas de tercios de octava (1600 Hz). Por otro lado, el envejecimiento de la mezcla experimental ha llevado a la reducción del ruido en altas frecuencias, aunque estas frecuencias son las menos determinantes en los niveles globales de ruido de rodadura.

Las figuras Fig. 4c y Fig. 4d muestran la evolución de cada una de las mezclas (referencia y experimental) entre la primera y la segunda campaña de auscultación. Si nos centramos en el intervalo de las medias frecuencias (el más determinante en los niveles globales de ruido de rodadura), observamos que mientras la mezcla de referencia no ha sufrido prácticamente cambios, la mezcla experimental con alto contenido en polvo de caucho ha incrementado su nivel

de intensidad sonora aproximadamente en 1 dB(A) en todas las bandas de 1 kHz a 2,5 kHz. En los siguientes apartados de este trabajo se estudiarán distintos parámetros que influyen en los mecanismos relacionados con la generación y amplificación del ruido, y que podrían justificar la evolución del comportamiento acústico de las mezclas estudiadas.

La Fig. 5 muestra las isófonas ( $L_{env-CPtr}$ ) producidas por un nivel de intensidad sonora (continuo)  $L_{CPtr,50km/h}$  igual a 89,2 dB(A) y 90,5 dB(A) respectivamente para la mezcla de experimental y de referencia en la segunda campaña de auscultación. Para esta simulación no se han considerado efectos como el relieve o el apantallamiento debido a construcciones, sino que sólo se ha considerado la atenuación del ruido debido a la divergencia geométrica, según la ecuación:

$$L_{CPtr,50km/h}(r_0) - L_{env-CPtr}(R) = 10 \text{ Log}(R/r_0)$$

donde R es la distancia a la fuente (eje de la carretera) de las diferentes isófonas y  $r_0$  es la distancia desde el foco emisor a los micrófonos donde se determina el nivel  $L_{CPtr,50km/h}$ .

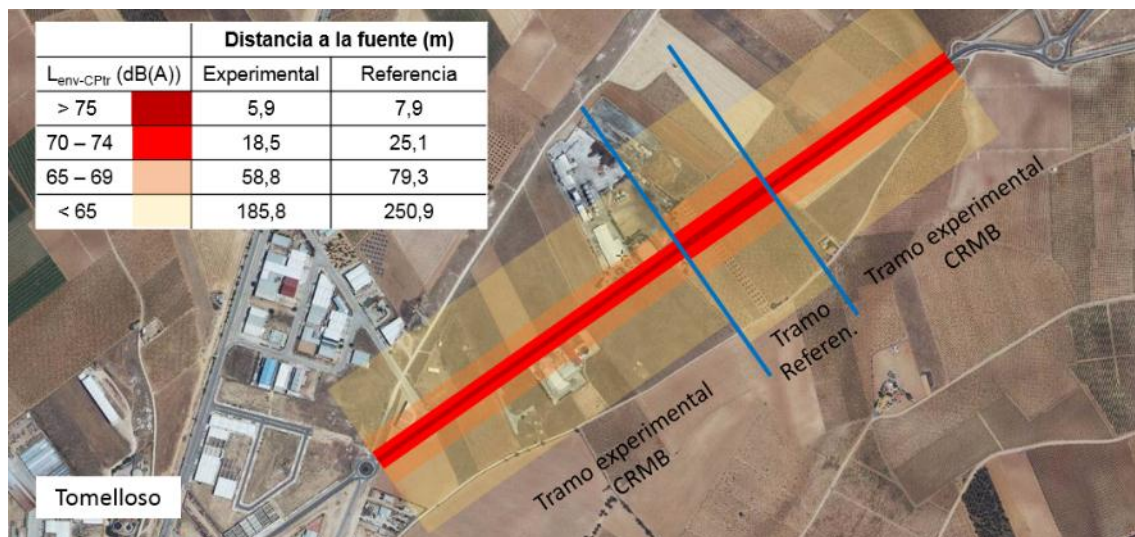


Fig. 5. Mapa de ruido de rodadura asociado a los niveles  $L_{CPtr,50km/h}$  (debido únicamente a divergencia geométrica).

### Macrotextura superficial e IRI

Al igual que para el caso del ruido de rodadura, se han realizado medidas del perfil de textura de las capas de rodadura durante la primera (+0) y la segunda (+3) campañas de auscultación. A partir de estas medidas se han obtenido los niveles de macrotextura media de cada tipo de mezcla (experimental y de referencia) mediante la MPD (Mean Profile Depth) [7] y de la regularidad superficial mediante el índice IRI (International Roughness Index) [4]. Los valores medios de estos índices, para cada superficie, se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Características superficiales de las mezclas bituminosas estudiadas.

Tramo	Primera campaña (+0)		Segunda campaña (+3)	
	MPD (mm)	IRI (m/km)	MPD (mm)	IRI (m/km)
Experimental (CRMB)	1,09	0,67	1,09	0,78
Referencia	1,22	1,15	1,17	1,18

Como se observa en la Tabla 1, los valores de MPD prácticamente no se han modificado entre la primera y la segunda campaña de auscultación. En el caso de la regularidad internacional (IRI), las variaciones tampoco son considerables, siendo los mayores incrementos los observados en la sección experimental (+0,11 m/km)

### Absorción acústica

Para la realización de las medidas de absorción acústica mediante el método del tubo de Kundt fue necesaria la obtención de probetas cilíndricas. La absorción acústica se determinó para los dos tipos de mezclas (experimental y referencia). En el caso de la primera campaña de auscultación, se recogió material durante el extendido de la capa de rodadura para posteriormente compactarlo en laboratorio hasta conseguir los valores de diseño de la mezcla. Para la realización de las medidas en la segunda campaña de auscultación se extrajo un testigo de la propia superficie de la carretera. Los espectros de absorción acústica de cada medida se muestran en la Fig. 6a.

De acuerdo a los resultados, no se puede afirmar que la adición de polvo de caucho en altas cantidades mejore la absorción acústica en la mezcla experimental, obteniéndose valores del coeficiente de absorción por debajo de 0,2. Por lo tanto, la mayor emisión sonora de la mezcla experimental en altas frecuencias se debería a otros efectos.

### Rigidez dinámica

Las medidas de rigidez dinámica se realizaron únicamente durante la segunda campaña de auscultación (+3). Estas medidas se realizaron tanto sobre las probetas extraídas de la capa de rodadura como sobre la propia superficie de la carretera. La Fig. 6b muestra los resultados:

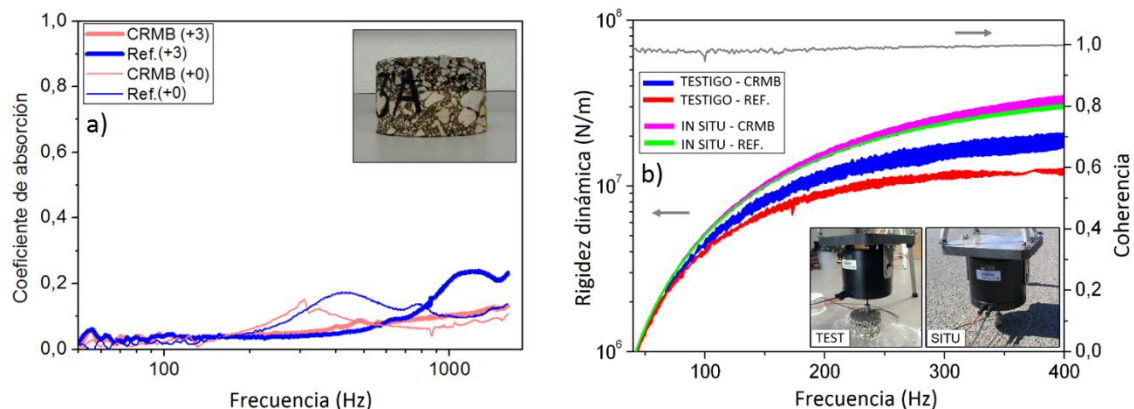


Fig. 6. a) Espectro de absorción sonora en incidencia normal sobre probetas y b) Rigidez dinámica medida in situ y en laboratorio sobre probetas.

La rigidez dinámica es mayor en el caso de la mezcla con alto contenido en polvo de caucho, ya que este material se emplea para mejorar las características del ligante y aumentar las prestaciones de la capa de rodadura. Sin embargo, de acuerdo a los resultados de emisión sonora, las diferencias no son suficientes como para hacer más ruidosa la mezcla experimental con respecto a la de referencia. En el caso de la mezcla experimental es posible que el aumento de rigidez entre la primera y la segunda campaña haya llevado al aumento del nivel de ruido en las medias frecuencias de esta mezcla. Sin embargo, debido a la ausencia de medidas de rigidez dinámica durante la primera campaña, no es posible confirmar este efecto.

### CONCLUSIONES

Se ha evaluado la evolución a medio plazo del comportamiento acústico de una mezcla experimental con alto contenido en polvo de caucho, respecto al comportamiento de una mezcla con las mismas características pero sin polvo de caucho. Tras los trabajos de auscultación se ha observado una reducción de la capacidad mitigadora del ruido de la mezcla experimental a lo largo del tiempo: desde 1,8 dB(A) en la primera campaña a 1,3 dB(A) en la segunda.

La reducción de la capacidad mitigadora del ruido en la mezcla experimental tiene lugar principalmente en las medias frecuencias. La variación en la regularidad superficial podría estar



detrás de los incrementos de ruido en bajas frecuencias, mientras que el incremento en medias frecuencias podría ser el producto de una rigidización de la mezcla fabricada con polvo de caucho a lo largo de los años. Sin embargo, serán necesarios más trabajos futuros para poder confirmar este proceso a largo plazo.

La mezcla experimental con alto contenido en polvo de caucho se presenta como una mezcla con características estructurales mejoradas debido a la adición de polvo de caucho. Esta mezcla además puede emplearse como medida de acción contra el ruido en zonas urbanas, ya que tanto en el corto como el medio plazo genera menos ruido por contacto neumático/pavimento que la mezcla de referencia. De este modo se afectada menor área por niveles de ruido elevados.

### AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo de este trabajo se ha contado con la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) en el marco del proyecto TRA2016-77418-R (AEI / FEDER, UE).

### REFERENCIAS

- [1] F. Soares, E. Freitas, C. Cunha, C. Silva, J. Lamas, S. Mouta, J.A. Santos, "Traffic noise: Annoyance assessment of real and virtual sounds based on close proximity measurements." *Transportation Research Part D*, 52, 399-407, 2017.
- [2] Ley 37/2003 de Ruido, de 17 de noviembre de 2003 (Boletín Oficial del Estado núm. 276).
- [3] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y el Consejo del 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas* 2002; 189:12-25.
- [4] V.F. Vázquez, J. Luong, M. Bueno, F. Terán, S.E. Paje. "Assessment of an action against environmental noise: Acoustic durability of a pavement Surface with crumb rubber". *Science of the Total Environment*, 542, 223-230, 2016.
- [5] S.E. Paje. "Innovación para el control del ruido ambiental". Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. Cuenca, 2013.
- [6] M. Bueno, J. Luong, F. Terán, U. Viñuela, V.F. Vázquez, S.E. Paje. "Noise reduction properties of an experimental bituminous slurry with crumb rubber incorporated by the dry process". *Coatings*, 4, 602-613, 2014.
- [7] S.E. Paje, J. Luong, V.F. Vázquez, M. Bueno, R. Miró. "Road pavement rehabilitation using a binder with a high content of crumb rubber: Influence on noise reduction". *Construction and Building Materials*, 47, 789-798, 2013.
- [8] V.F. Vázquez, S.E. Paje. "Study of the road surface properties that control the acoustic performance of a rubberised asphalt mixture". *Applied Acoustic*, 102, 33-39, 2016.
- [9] V.F. Vázquez, F. Terán, U. Viñuela, S.E. Paje. "Study of a road test track with and without crumb rubber. Solutions for noise pollution". *Environmental Engineering and Management Journal*, 10 (13), 2487-2495, 2014.

[10] V.F. Vázquez, S.E. Paje. “Dynamic stiffness assessment of construction materials by the resonant and non-resonant methods”. Journal of Non-destructive Evaluation, 35:34, 2016.

[11] J. Luong, M. Bueno, V.F. Vázquez, S.E. Paje. “Ultrathin porous pavement made with high viscosity asphalt rubber binder: A better acoustic absorption?” Applied Acoustic, 79, 117-123, 2014.