

CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS BITUMINOSAS MEDIANTE DIFERENTES TÉCNICAS DE ENSAYO: RIGIDEZ DINÁMICA, CPX Y ABSORCIÓN ACÚSTICA

PACS: 43.50.Lj

Fernández Vázquez, Victoriano; Expósito Paje, Santiago
Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM). E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos.
Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España
Victoriano.Fernandez@uclm.es, Santiago.exposito@uclm.es

ABSTRACT

Noise pollution is perhaps the most widespread form of pollution in industrialized cities, especially in medium-high sized cities. Within this type of noise pollution, the noise generated by traffic, particularly tire/road noise, plays an important role. Knowledge of the mechanisms involved in road noise has increased considerably in recent years. Some of the research works conducted by the Laboratory of Acoustics Applied to Civil Engineering (LA2IC-UCLM) on various bituminous mixtures are shown in this paper. The mixtures have been studied by means of different characterization tests: dynamical stiffness and sound absorption.

RESUMEN

La contaminación acústica es posiblemente la forma de contaminación más generalizada en las ciudades industrializadas, especialmente en las de tamaño medio-alto. Dentro de este tipo de contaminación, el ruido generado por el tráfico de vehículos, y particularmente el ruido de rodadura tienen un papel relevante. En los últimos años se ha aumentado notablemente el conocimiento de los mecanismos implicados en el ruido de rodadura. En este trabajo se muestran algunas de las investigaciones desarrolladas por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA2IC.UCLM) sobre distintas mezclas bituminosas y mediante diferentes ensayos de caracterización: rigidez dinámica y absorción sonora.

INTRODUCCIÓN

Una de las características que se relacionan de forma casi inevitable con las sociedades modernas es el ruido. El ruido es un tipo de contaminación que no se acumula como los residuos convencionales con los que estamos familiarizados, sino que es una forma de energía que se disipa tras un corto periodo de tiempo. Esta característica es la principal responsable de que tradicionalmente no se hayan establecido límites a las emisiones sonoras. Actualmente, la existencia de fuentes continuas de ruido como pueden ser los centros industriales o la ubicación de infraestructuras del transporte como carreteras y autovías con tráfico continuo, han hecho que se revisen y adapten las legislaciones, estableciendo cotas máximas a la

generación sonora en zonas urbanas o rurales según el uso al que están destinadas dichas áreas. Desde los años 80 ya existen precedentes de normativas de ámbito nacional e internacional, sin embargo, en España no se dispone de una legislación de ámbito estatal hasta 2003 [1], donde se busca prevenir y reducir la contaminación acústica siguiendo la idea que se recoge en la directiva europea de 2002 [2].

En el caso particular de las vías de comunicación, existen diferentes fuentes de generación de ruido provocadas por la circulación de un vehículo sobre la carretera. Entre las distintas fuentes, el ruido de rodadura es predominante para velocidades de circulación superiores a 40 km/h, es decir, para la mayoría de vías urbanas e interurbanas. Es por ello que es de gran importancia el conocer los distintos mecanismos de generación del ruido de rodadura, así como la participación en la emisión sonora total de cada uno de ellos y el modo de actuar con el fin de reducir este tipo de contaminación.

Este trabajo se centra en el estudio de la rigidez dinámica (impedancia mecánica) de las superficies de carretera construidas con diferentes tipos de mezcla bituminosa Stone Mastic Asphalt (SMA). Para ello se han ensayado con un excitador de vibraciones, registrando la respuesta de cada mezcla a la sollicitación realizada. Por otro lado, se han realizado ensayos de absorción acústica con el fin de determinar las diferencias existentes entre las distintas mezclas bituminosas. En total se han ensayado siete tipos de mezcla SMA. Los resultados permitirán determinar la influencia sobre la rigidez de las diferentes composiciones y características de ejecución de las mezclas, así como su repercusión en el ruido de rodadura.

TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Existen varias técnicas para la caracterización acústica de mezclas bituminosas. El Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA²IC) cuenta con varios equipos, como son el Tiresonic Mk4 La²IC (Figura 1), o el LaserStaticPG-LA²IC. Dichos equipos tienen como objetivo la determinación del ruido de rodadura mediante la metodología CPX [3-7] y la textura superficial del pavimento, respectivamente [8].

El LA²IC también cuenta con un tubo de impedancia y un excitador de vibraciones, que son los equipos que se emplearán en este trabajo. Estas dos técnicas experimentales no se centran realmente en los mecanismos de generación de ruido de rodadura, sino que estudian respectivamente el efecto de la impedancia mecánica y el de la impedancia acústica. Estos efectos están encuadrados dentro de los mecanismos relacionados con la amplificación o reducción del ruido de rodadura, de acuerdo con la clasificación de Sandberg y Ejsmont [9].



Figura 1. Tiresonic Mk4 La²IC

Excitador de Vibraciones.

Tanto la rigidez dinámica como la impedancia mecánica son características de una estructura, en nuestro caso, la probeta de lo que será la capa de rodadura de una carretera. Estos valores relacionan el vector fuerza y el vector movimiento de una superficie que se encuentra sollicitada dinámicamente, siendo esta relación en término de números complejos. En función de cómo se presenta el vector movimiento se pueden definir las relaciones complementarias que se muestran en la Tabla 1, según se considere la velocidad o el desplazamiento de la superficie ensayada.

La determinación de los espectros de rigidez dinámica y de impedancia mecánica se ha realizado mediante la aplicación del método no resonante [10] directamente sobre la cara superior de las probetas, previamente fijadas a la superficie de apoyo [11]. La configuración del equipo de ensayo cuenta con una cabeza de impedancia, la cual registra las señales fuerza y

movimiento de la superficie estudiada. Un excitador de vibraciones es el encargado de realizar la excitación, mientras que un amplificador acondiciona la señal. Por otro lado, un sistema multi-analizador se encarga de generar y registrar las señales fuerza y movimiento y a partir de ellas elaborará la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de las funciones rigidez dinámica e impedancia mecánica. El equipo excitador de vibraciones se muestra en la Figura 2, durante la realización de uno de los ensayos.

Tabla 1. Relaciones dinámicas fuerza - movimiento

Terminología	Relación	Unidades
Peso aparente	F/a	$[Ns^2/m]$
Impedancia mecánica	F/v	$[Ns/m]$
Rigidez dinámica	F/d	$[N/m]$
Aceleración vs fuerza	a/F	$[m/Ns^2]$
Movilidad	v/F	$[m/Ns]$
Conformidad	d/F	$[m/N]$

Para la realización de las medidas se ha empleado un barrido de frecuencias en el intervalo estudiado, registrando el espectro resultado en el intervalo de frecuencias entre 10 Hz y 400 Hz.



Figura 2. Excitador de vibraciones

Tras los ensayos realizados, y a partir de los resultados obtenidos se obtiene el espectro de rigidez dinámica en el intervalo de frecuencias deseado. Cada una de las probetas se ensaya tres veces, de modo que se asegure la reproducibilidad de los resultados sobre cada una de ellas (Figura 3).

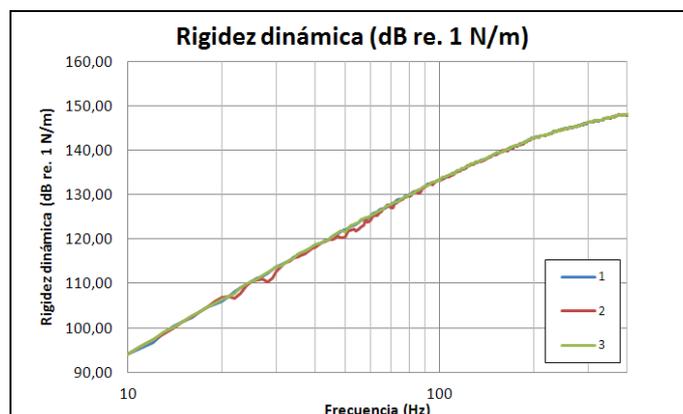


Figura 3. Repetición de las medidas sobre una misma probeta

Tras obtener el espectro de rigidez dinámica de cada una de las probetas de un mismo tipo de mezcla bituminosa se determina el espectro medio de las mismas, el cual caracterizará ese tipo de mezcla.

Del mismo modo se trabaja en el caso del espectro de impedancia mecánica. Una vez obtenidos dichos espectros se ha considerado la curva comprendida en el intervalo de interés, entre 10 y 100 Hz. En dicho intervalo se ha determinado la rigidez dinámica como la integral de la curva en dicho intervalo, tal y como se muestra en la Figura 4:

$$S = \int I_m \cdot df$$

Siendo S [N/m] la rigidez dinámica para cada frecuencia, I_m [Ns/m] la impedancia mecánica y f [1/s] la frecuencia.

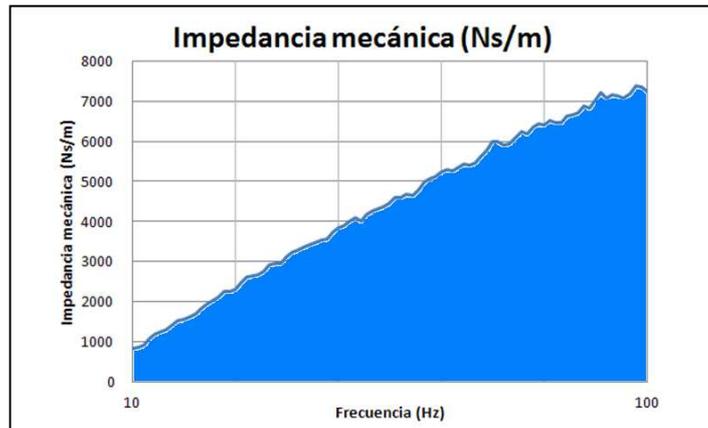


Figura 4. Cálculo de la rigidez dinámica a partir de la impedancia mecánica.

El cálculo de la rigidez dinámica a partir de la curva de impedancia mecánica permite cuantificar la rigidez dinámica de las muestras estudiadas, de modo que los resultados se puedan comparar numéricamente. El cálculo de la rigidez dinámica se realiza en un intervalo de bajas frecuencias, ya que es en estas frecuencias donde se define la flexibilidad de la superficie estudiada [12]. Por otro lado, en estas frecuencias es donde se obtiene una función de coherencia de los resultados próxima al valor unidad.

Tubo de Impedancia.

Para la realización de las medidas de absorción acústica se ha empleado el método del tubo de impedancia o tubo de Kundt (Figura 5) [13]. Este método permite determinar el coeficiente de absorción (α). El método de ensayo emplea un tubo de impedancia con una fuente sonora en uno de sus extremos y la muestra ensayada en el extremo opuesto. El intervalo de frecuencias estudiado con este equipo es el comprendido entre 50 Hz y 1,6 kHz.



Figura 5. Tubo de impedancia

MATERIALES ESTUDIADOS

Se han estudiado mezclas bituminosas del tipo SMA (Stone Mastic Asphalt). Estas mezclas son de tipo discontinuo, formadas por un esqueleto de árido grueso fuertemente cohesionado debido a la alta proporción de filler y de betún y al bajo contenido de huecos en mezcla. Sus características aseguran una mezcla muy duradera y con gran capacidad para resistir deformaciones permanentes. Por otro lado, las mezclas SMA ordinarias tienen una elevada rugosidad, lo que produce unas propiedades excelentes de resistencia al deslizamiento. Debido a estas características, este tipo de mezclas son ideales para su extendido en todo tipo de vías, ya que permiten ahorrar costes de mantenimiento así como mejorar las condiciones de seguridad. Sin embargo, y a pesar de sus ventajas, su uso no está muy extendido en nuestro país. Este trabajo busca la caracterización de este tipo de mezclas, de modo que se aumente el conocimiento sobre ellas, concretamente en el campo del ruido de rodadura.

Para este trabajo se han ensayado siete tipos de mezcla SMA con diferentes características tanto en el contenido de aditivos como en el modo de construcción. Para cada uno de los tipos de mezcla bituminosa se ha dispuesto de un juego de 3 probetas de características similares, de modo que se obtenga reproducibilidad en los resultados obtenidos.

Mezclas Ensayadas.

Las mezclas que se han ensayado en este trabajo, junto con sus características, se muestran en la Tabla 2. Todas las mezclas han sido fabricadas en laboratorio y se han moldeado en probetas cilíndricas de 60 mm de altura y 100 mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 2. Tipos de mezclas SMA estudiadas

Mezcla	Denominación	Característica
SMA 11 3c	3c	Betún modificado con polímeros
SMA 11 35/50	35	Betún convencional
SMA 11 C	C	Betún mejorado con polvo de caucho
SMA 11 E	E	Alto contenido en huecos
SMA 11 F	F	Mezcla en frío
SMA 11 L	L	Alto contenido en ligante
SMA 11 T	T	Mezcla Templada

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Rigidez Dinámica e Impedancia Mecánica.

Se han ensayado siete grupos de probetas de mezcla bituminosa tipo SMA, cada una de ellos compuesto por un conjunto de tres probetas similares. En la Figura 6 se muestran los resultados medios del espectro de rigidez dinámica de las mezclas estudiadas. Los resultados se muestran en el intervalo de frecuencias entre 10 Hz y 400 Hz, en escala logarítmica.

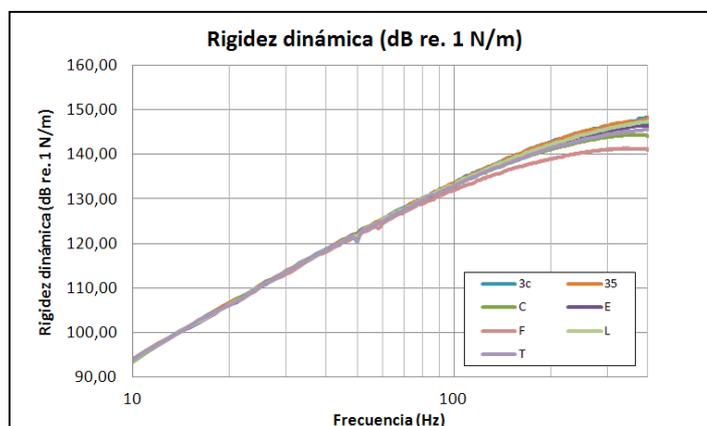


Figura 6. Espectro de Rigidez dinámica

En los resultados mostrados en la Figura 6 se observa cómo todas las mezclas tienen un comportamiento similar para frecuencias menores a 100 Hz, siendo a partir de esta frecuencia

cuando las diferencias se hacen mayores. Concretamente con la mezcla SMA 11 elaborada en frío (F) es con la que se observan los menores valores de rigidez dinámica, mientras que las diferencias encontradas entre los otros tipos de mezcla bituminosa son más reducidas. Para el estudio de las bajas frecuencias, las que se encuentran por debajo de 100 Hz, se ha recurrido a la definición de un indicador a partir de los espectros de impedancia mecánica, tal y como se indica en el apartado de Técnicas Experimentales. Los espectros de impedancia mecánica obtenidos tras la realización de los ensayos son los mostrados en la Figura 7, en escala lineal.

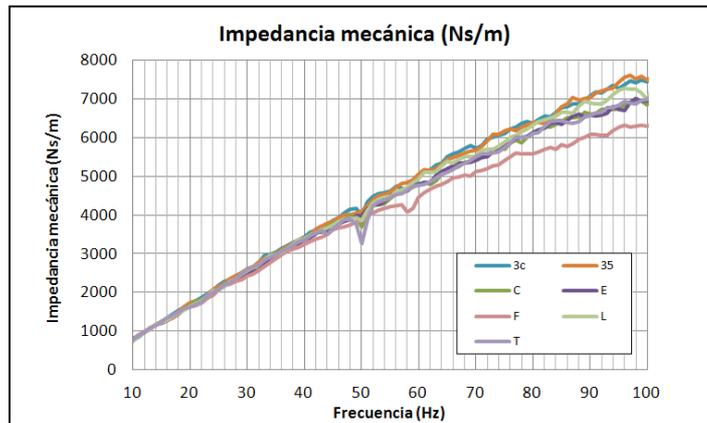


Figura 7. Espectro de Impedancia mecánica

A partir de los espectros de la Figura 7, es posible cuantificar numéricamente la rigidez dinámica, tal y como se indica en el apartado de Técnicas Experimentales. Los valores medios obtenidos para cada tipo de mezcla, así como los valores de cada probeta se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Tipos de mezclas SMA estudiadas

Mezcla	Valor Medio	Rigidez dinámica kN/m		
		Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
3c	402	402	402	402
35	402	400	405	400
C	382	382	381	384
E	382	379	386	381
F	358	357	358	360
L	392	383	404	389
T	381	383	381	380

En la Figura 8 se muestran gráficamente los valores medios de cada tipo de mezcla así como la desviación estándar obtenida para las probetas estudiadas.

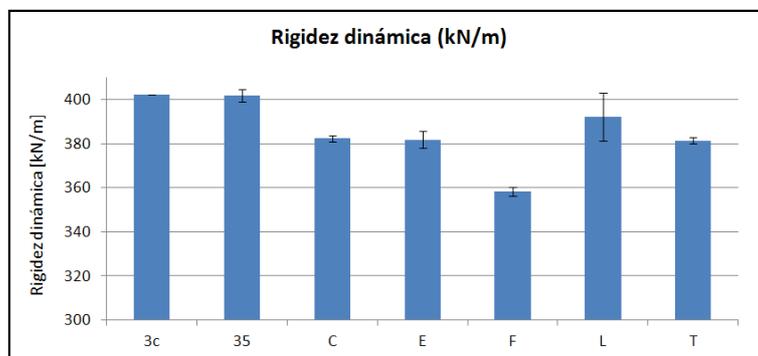


Figura 8. Valores medios de rigidez dinámica y desviación estándar

Como se observa en los gráficos anteriores, tanto la mezcla SMA 11 con betún convencional (35) como con betún modificado con polímeros (3c) dan unos resultados similares, que son los mayores registrados. En el extremo opuesto se encuentra la mezcla SMA en frío (F), mientras

que en el intervalo medio están las mezclas SMA 11 con algún tipo de modificación en su composición, como las mezclas con polvo de caucho (C) o con alto porcentaje de huecos (E).

Tubo de Impedancia.

Mediante el tubo de impedancia se han ensayado las mismas probetas que mediante el excitador de vibraciones, con resultados similares en todas ellas. En la Figura 9 se muestran algunos de los resultados obtenidos, concretamente los pertenecientes a las probetas SMA 11 C, SMA 11 F, SMA 11 L y SMA 11 T. Como se observa en la figura, ninguna de las mezclas ensayadas supera el coeficiente de absorción de 0,2.

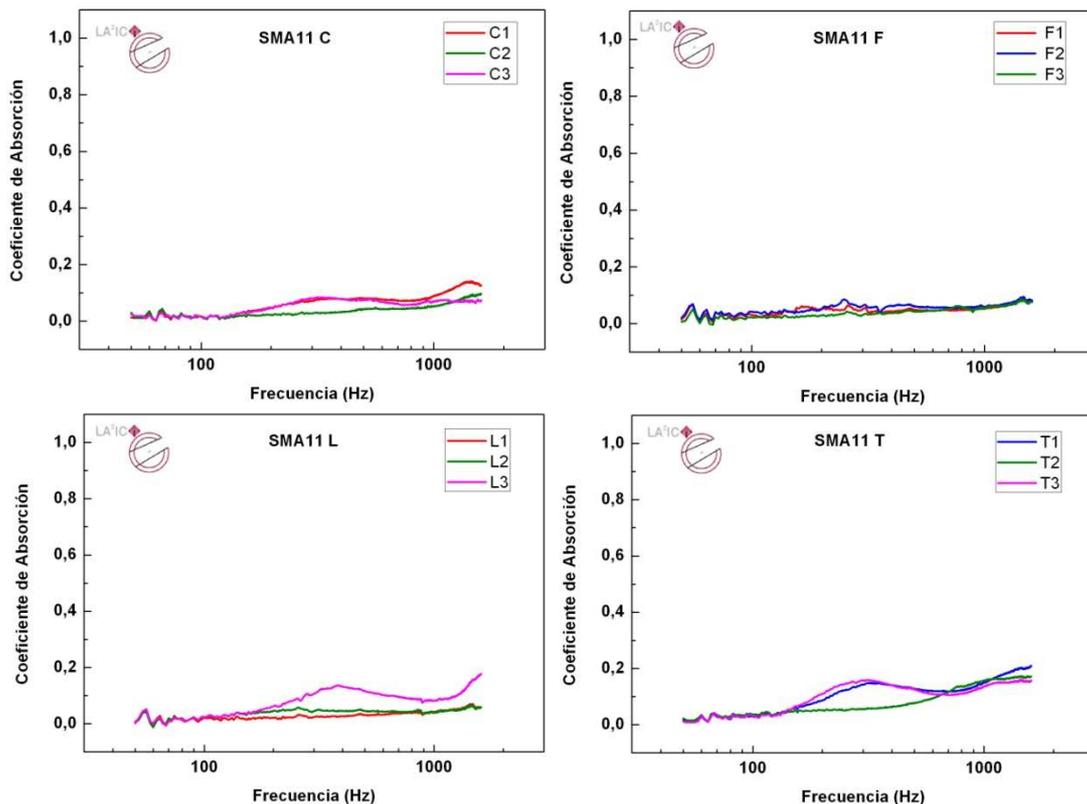


Figura 9. Coeficientes de absorción de varias de las mezclas estudiadas

CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio en laboratorio centrado en dos de las propiedades relacionadas con el ruido de rodadura, de modo que se consiga un conocimiento más profundo de los mecanismos relacionados con la amplificación o reducción del ruido de rodadura generado por un vehículo. Las propiedades estudiadas han sido la rigidez dinámica y el coeficiente de absorción, ambos relacionados con el tipo de mezcla sobre la que circulan los vehículos. Dichas propiedades están relacionadas respectivamente con la impedancia mecánica y la impedancia acústica de una superficie dada. Por su parte, estos parámetros, a su vez, están relacionados con el ruido de rodadura.

Se ha evaluado la rigidez dinámica de diferentes probetas de mezcla bituminosa mediante un método que permite obtener valores particularizados para cada tipo de mezcla y con una desviación estándar reducida.

Según los resultados obtenidos, se observa que la mezcla SMA 11 en frío (F) tiene una rigidez dinámica sensiblemente inferior a la del resto de mezclas, lo cual puede traducirse en un contacto más elástico entre el neumático y el pavimento, y por lo tanto en una reducción del ruido debido a impactos y vibraciones. Por otro lado, las mezclas con modificaciones como el añadido de polvo de caucho (C), el aumento del porcentaje de huecos (E) o la elaboración de mezclas templadas (T) conllevan una reducción de la rigidez dinámica respecto de las mezclas SMA con betún convencional (35) o con betún modificado con polímeros (3c). Por último, con

las mezclas con alto contenido en ligante (L) parece que se consigue una ligera reducción de la rigidez dinámica, sin embargo, en este caso los datos tienen una desviación estándar elevada, a diferencia con el resto de mezclas estudiadas.

Por otro lado, tras el estudio de la impedancia acústica y de los coeficientes de absorción de las diferentes mezclas, no se han encontrado diferencias significativas entre ellos, siendo en todos los casos muy bajos (inferiores a 0,2). A raíz de los resultados obtenidos, los mecanismos de reducción del ruido de rodadura relacionados con la impedancia acústica no parece que sean decisivos en las probetas estudiadas.

De acuerdo con los resultados de impedancia acústica y de impedancia mecánica, se podría decir que en este tipo de mezclas SMA, compactadas en laboratorio, únicamente la rigidez dinámica puede tener un efecto que se aprecie en el ruido de rodadura de las diferentes superficies, especialmente entre las mezclas en frío y cualquiera de los otros tipos de mezcla estudiados en este trabajo. Sin embargo, para poder conocer más a fondo la influencia de la rigidez dinámica en el ruido de rodadura de este tipo de mezclas (en frío) será necesario realizar más estudios, tanto del propio ruido de rodadura de estas superficies como de la importancia de la textura de la misma en los niveles sonoros emitidos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) y a los fondos FEDER, dentro del marco del proyecto BIA 2012-32177, "Impedancia mecánica de superficies de carretera con polvo de caucho (NFU). Influencia en la generación y propagación del ruido de rodadura". También se quiere agradecer el apoyo a CDTI y ELSAN por su participación a través del proyecto "Mezclas bituminosas SMA normalizadas (UNE-EN 13108-5) sostenibles y medioambientalmente amigables".

REFERENCIAS

- [1] *Ley 37/2003, de Ruido*, de 17 de noviembre de 2003 (Boletín Oficial del Estado num. 276)
- [2] Directiva 2002/49/CE de 25 de junio de 2002 *sobre evaluación y gestión del ruido ambiental*
- [3] R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, O. Reyes, S.E. Paje, M. Bueno, *Effect of crumb rubber bituminous mixes on functional characteristics of road pavements*. Transportation Research Record 2126 (2009) 83-90
- [4] S.E. Paje, M. Bueno, U. Viñuela, F. Terán, *Toward the acoustical characterization of asphalt pavements: Analysis of the tire/road sound from a porous surface (L)*. J. Acoust. Soc. A. 125, 2009
- [5] S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán, R. Miró, F. Pérez-Jiménez, A.H. Martínez, *Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber*. Applied Acoustics 71 (2010) 578-582
- [6] M. Bueno, J. Luong, U. Viñuela, F. Terán, S. E. Paje, *Pavement temperature influence on close proximity tire/road noise*, Applied Acoustics 72 (2011) 829-835
- [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 (2013) 789-798
- [8] S.E. Paje, M. Bueno, F. Terán, U. Viñuela, J. Luong. *Assessment of asphalt concrete acoustic performance in urban streets*. J. Acoust. Soc A, 123 (2008), 1439-1445
- [9] U. Sandberg, J.A. Ejsmont. *Tire/Road Noise Reference Book*. Ed. Informex (Suecia 2002)
- [10] Lauge Fulgsang Nielsen, *Improved method for complex modulus estimation*. Brüel & Kjaer application note
- [11] V.F. Vázquez, S.E. Paje. *Dynamic stiffness of bituminous mixtures. Measurement technique and influence on tire/road noise*, Internoise, Innsbruck (Austria), 2013
- [12] Vivek Khanna, Michael A. Mooney, Gerald A. Miller, *Impulse Response Dynamic Stiffness Decay in Aging General Aviation Airfield Pavements*. Transportation Research Record 2304 (2012) 119-129
- [13] Norma UNE-EN ISO 10534-2 *Acústica. Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de la función de transferencia*