

## CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DE MEZCLAS BITUMINOSAS CON POLVO DE CAUCHO PARA EL DESARROLLO DE CARRETERAS CON CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS MEJORADAS

PACS: 43.50.Lj

**Gil-Abarca A, Vázquez V.F, García-Hoz A.M, Terán F, Paje S.E**

Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil LA<sup>2</sup>IC, Universidad de Castilla-La Mancha. Avda. Camilo José Cela s/n, 13071 Ciudad Real, España.  
Alejandra.gabarca@uclm.es

### ABSTRACT

Laboratory characterization of the bituminous mixtures of the pavements wearing courses is an essential procedure for estimating the acoustic performance of the materials used in road construction. On the other hand, the development of new materials allows the construction of pavements with improved acoustic characteristics, with the aim of reducing environmental noise and the nuisance caused by the generation of high sound levels. This document describes the methodology followed by the Laboratory of Acoustics Applied to Civil Engineering (LA<sup>2</sup>IC) for the characterization of bituminous mixtures in the laboratory. Sound absorption, surface texture, dynamic stiffness and rolling resistance are some of the characterization techniques described. The characterization measurements presented were carried out on an experimental gap-graded mixture type Stone Mastic Asphalt (SMA-8) with crumb rubber from end-of-life tires (ELT). The crumb rubber was added by the so-called dry process during the manufacture of the mixture. These discontinuous mixtures are used for wearing courses and show good acoustic performance. Finally, the results will be compared with those obtained on two types of mixtures with very different characteristics from those of the SMA: a porous PA12 mixture and a polished concrete.

**Keywords:** SMA-8, acoustic performance, crumb rubber, dynamic stiffness, rolling resistance.

### RESUMEN

La caracterización en laboratorio de las mezclas bituminosas que conforman la capa de rodadura de una carretera es un procedimiento esencial destinado a estimar el comportamiento acústico de los materiales empleados en la construcción de las vías. Por otro lado, el desarrollo de nuevos materiales permite la construcción de pavimentos con características acústicas mejoradas, con el objetivo de reducir el ruido ambiental y las molestias ocasionadas por la generación de elevados niveles sonoros. El presente documento describe la metodología seguida por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA<sup>2</sup>IC), para la caracterización de mezclas bituminosas en laboratorio. La absorción acústica, la textura superficial, la rigidez dinámica y la resistencia al deslizamiento son algunas de las técnicas de caracterización descritas. Las medidas de caracterización presentadas se han realizado sobre una mezcla experimental de tipo discontinuo Stone Mastic Asphalt (SMA-8) con polvo de caucho proveniente de neumático fuera de uso (NFU). El polvo de caucho se añadió mediante el denominado proceso seco durante la fabricación de la mezcla. Estas mezclas discontinuas se utilizan para capas de rodadura y presentan un buen comportamiento acústico. Por último, se compararán los resultados con los obtenidos en dos tipos de mezclas con características muy diferentes a las de la SMA: una mezcla porosa PA12 y un hormigón pulido.

**Palabras Clave:** SMA-8, comportamiento acústico, polvo de caucho, rigidez dinámica, resistencia al deslizamiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ruido generado por la rodadura es una cuestión que causa preocupación en el entorno de las carreteras, principalmente en zonas urbanas. Con el avance de las tecnologías y los nuevos materiales, una de las soluciones para mitigar el ruido generado es implementar materiales reciclados en las mezclas asfálticas convencionales y, mediante diferentes técnicas de laboratorio, evaluar la respuesta que tiene el uso de estos materiales en los mecanismos de generación del ruido.

El material reciclado que centra esta línea de investigación es el polvo de caucho procedente de neumáticos fuera de uso. Este material será incorporado en mezclas de tipo SMA-8 en un determinado porcentaje. Posteriormente, sobre estas mezclas se han realizado diferentes ensayos en laboratorio para examinar su comportamiento en relación a la generación del ruido. Los ensayos se han centrado en las siguientes características: la rigidez dinámica, la absorción acústica, la resistencia al deslizamiento y la textura superficial.

De acuerdo con la literatura, la principal interacción entre neumático y pavimento está relacionada con la textura [1]. En este ámbito, ciertas mezclas que poseen más irregularidades y, consecuentemente, más textura, serán las generadoras de mayores niveles de ruido a determinadas frecuencias del espectro de emisión sonora.

La rigidez dinámica es uno de los factores que puede contribuir a la amplificación o reducción del ruido. La utilización del polvo de caucho, siendo un material más flexible, podría reducir la rigidez dinámica del pavimento y, por consiguiente, reducir los niveles sonoros durante su vida útil.

En los últimos años, el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil ha trabajado en la caracterización del comportamiento de distintas mezclas en relación al ruido [2, 3]. En los trabajos desarrollados se incluye la metodología empleada para la realización de diferentes ensayos, los cuales son la base teórica que ha servido de referencia para este estudio.

Para alcanzar un conocimiento detallado del comportamiento de una mezcla en laboratorio, en este trabajo se describe la metodología a seguir para cada una de las técnicas de caracterización asociadas a la generación del ruido. Entre las técnicas de caracterización existentes, se detalla el procedimiento a seguir para realizar los ensayos de rigidez dinámica y textura superficial, así como los ensayos de absorción acústica y resistencia al deslizamiento. Una vez definidos los procedimientos de las técnicas de caracterización, se muestran los resultados que arroja cada ensayo para las mezclas de tipo SMA-8 con adición de un 1% de polvo de caucho y se comparan con dos mezclas de referencia de características muy diferentes, como son la mezcla porosa PA-12 y un hormigón pulido. La comparación con estos materiales permitirá observar la capacidad de las distintas técnicas para la caracterización acústica.

## 2. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 2.1. Rigidez dinámica

La rigidez dinámica de un pavimento es una característica relacionada con la deformación de la superficie y, por tanto, con la generación de ruido producida entre los neumáticos y el pavimento. La rigidez dinámica ( $S$ ) se define como la relación existente entre la fuerza que actúa en una estructura ( $F$ ) y el desplazamiento que se produce en su superficie ( $x$ ) [4].

$$S = F/x \quad (1)$$

La rigidez dinámica ha sido evaluada en este estudio mediante el método No Resonante. Para determinar la rigidez dinámica mediante la metodología experimental es necesario un equipo excitador de vibraciones y una cabeza de impedancia, que está en contacto con la cara superior de la mezcla, donde las medidas son tomadas. El contacto entre la cabeza de impedancia y la mezcla se ejecuta mediante una placa circular de 14 milímetros de diámetro, que queda fijada a la superficie.



Figura 1.- Equipo de medida utilizado para efectuar los ensayos de rigidez dinámica en laboratorio. Excitador de vibraciones y cabeza de impedancia.

Este dispositivo mide la fuerza aplicada y el desplazamiento producido en la superficie de la mezcla. Las señales de fuerza y desplazamiento son registradas por un equipo multi-analizador y, haciendo uso de la Transformada Rápida de Fourier, se genera el espectro de rigidez dinámica. La señal emitida por el excitador de vibraciones será una señal aleatoria y la medida de rigidez dinámica indicará la capacidad que posee la mezcla para resistir el movimiento cuando una determinada fuerza es aplicada sobre ella.

De manera previa al comienzo del ensayo, las probetas a estudiar se colocan sobre una superficie lisa, rígida y libre de irregularidades. Además, cada una de las probetas ensayadas se fija a esta superficie mediante una fina capa de escayola, evitando así cualquier vibración indeseada.

Como se anticipaba, el resultado que se obtiene de la realización de este ensayo es un espectro de rigidez dinámica de cada una de las probetas objeto de ensayo para unas frecuencias comprendidas entre 1 Hz y 6 kHz. Dentro de este intervalo de frecuencias, se han seleccionado los valores de rigidez dinámica para el valor concreto de 400 Hz, a partir del cual se puede establecer una comparativa entre distintas mezclas.

## 2.2. Textura superficial

El estudio de la textura superficial de las distintas probetas consiste en la determinación de su perfil longitudinal, procedimiento que es posible mediante la utilización de un perfilómetro láser. Este equipo recoge, además de otros parámetros, la profundidad media del perfil de la superficie que posee cada una de las probetas ensayadas, denominada MPD (Mean Profile Depth) y de acuerdo con la norma ISO 13473-1, 2019 [5]. Este dispositivo escanea una determinada área de cada probeta, de dimensiones previamente establecidas, y genera una representación en tres dimensiones de la superficie.

La textura superficial engloba diferentes ámbitos; entre los cuales se encuentra la microtextura, y la macrotextura. La microtextura corresponde a la textura superficial propia de los áridos que conforman una mezcla. La macrotextura, en cambio, se corresponde con la textura superficial del firme, compuesto por el conjunto de los áridos que conforman una mezcla bituminosa. En órdenes de magnitud, la microtextura es la desviación de la superficie del pavimento medida sobre una longitud de onda inferior a 0,5 milímetros. Por su parte, la macrotextura es la desviación de la superficie del pavimento medida sobre una longitud de onda comprendida entre los 0,5 milímetros y los 50 milímetros.

Una vez conocidos los valores de profundidad del perfil de una mezcla, es posible determinar el espectro de textura asociado a la mezcla, para así poder detectar cambios en microtextura o macrotextura al aplicar un nuevo material a una mezcla convencional, como es en este caso el polvo de caucho. Con los datos de profundidad del perfil, se ha implementado un modelo con software Matlab mediante el cual se obtienen los espectros de textura que caracterizan a una determinada mezcla. En este espectro, se representa en el eje horizontal la longitud de onda medida en milímetros y en el eje vertical su nivel de textura asociada medida en dB.

Para obtener parámetros que permitan caracterizar la textura, se determina el nivel del perfil de textura de un tercio de banda de octava  $L_{tx,m}$  (en dB), que se calcula como sigue:

$$L_{tx,m} = 10 \log \left( \frac{Z_{p,m}}{a_{ref}^2} \right) dB \quad (2)$$

Donde  $a_{ref}$  es el valor de referencia de la amplitud del perfil de superficie ( $a_{ref} = 10^{-6} m$ ) y  $Z_{p,m}$  es la potencia dentro de la banda de un tercio de octava  $m$  [6].

En este ámbito, es interesante estudiar los diferentes intervalos de la textura superficial para poder detectar cambios al implementar nuevos materiales. Una vez obtenidos los espectros de textura, se presentará la comparativa entre la mezcla SMA-8 con la mezcla porosa PA-12 y el hormigón pulido, pudiendo determinar así las diferencias en su textura.

### 2.3. Resistencia al deslizamiento

Esta metodología experimental es llevada a cabo en laboratorio mediante el péndulo de fricción y según la norma UNE-EN 13036-4 [7]. Para poner en funcionamiento este equipo, es necesario disponer del propio péndulo, un patín de goma que aporta una superficie de rozamiento con la mezcla de ensayo, una regla para medir la superficie de rozamiento del patín y una serie de instrumentos auxiliares para acondicionar el patín de manera previa a la práctica de los ensayos.

De manera previa al comienzo de las medidas, se comprueba que el péndulo se encuentre nivelado y se calibra.

Para comenzar las medidas, se coloca la probeta de la mezcla a ensayar en la parte inferior del péndulo, colocado en posición vertical. Sobre la probeta, se ajusta la altura del péndulo para cumplir con la superficie de deslizamiento del patín requerida. Una vez calibrados estos parámetros, se procede a la toma de medidas de resistencia al deslizamiento.

El péndulo de fricción se deja caer libremente desde una posición horizontal, provocando el rozamiento con la mezcla objeto de ensayo, que produce el frenado del péndulo por fricción. Al producirse este fenómeno, la pérdida de energía del péndulo debido a la fricción del pavimento se refleja en la altura a la que sube el patín tras la fricción con la superficie de la probeta. El valor de resistencia al deslizamiento obtenido en cada medida se registra manualmente y los valores representativos de cada mezcla se corresponden con la media de las distintas mediciones realizadas.

Las medidas llevadas a cabo se han realizado sobre un pavimento tipo SMA-8 en seco y en condiciones húmedas. Al realizar cada medición en seco, se ha dispuesto de un sonómetro, colocado en la zona de impacto entre el patín y la probeta, el cual recoge el ruido generado durante el rozamiento entre el patín y la superficie de rodadura, de modo que se pueda relacionar con los valores de resistencia al deslizamiento. La medida generada por el sonómetro es un espectro de sonido, asociado a una probeta determinada. En el caso de las mediciones tomadas con pavimento húmedo, únicamente se tiene registro de los valores de resistencia al deslizamiento arrojados por el péndulo, ya que con el agua los equipos electrónicos como el sonómetro podrían ser dañados.



Figura 2.- Equipo de medida de resistencia al deslizamiento de pavimentos. Péndulo de fricción y patín acondicionado según norma.

#### 2.4. Absorción acústica

La metodología experimental que se encuentra directamente relacionada con el ruido reflejado por un pavimento es la absorción acústica.

El instrumento más comúnmente utilizado para medir la absorción de un material es el denominado tubo de impedancia, que consiste en un tubo largo de paredes rígidas. El ensayo consiste en conectar una fuente sonora en un extremo del tubo de impedancia e introducir una probeta de ensayo en el otro extremo del tubo, con el objetivo de conocer la absorción del sonido al reflejarse sobre la superficie de la mezcla. Para ello, son requeridos dos micrófonos, situados en distintas posiciones y un sistema digital de análisis de señal. Este procedimiento sigue las instrucciones de la norma UNE-EN ISO 10534-2 [8].

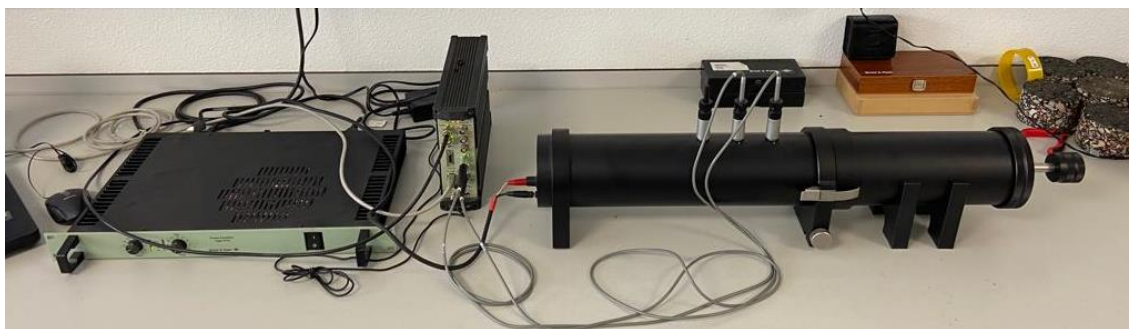


Figura 3.- Equipo de medida de absorción acústica mediante tubo de absorción.

El coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) se define mediante la relación entre la energía acústica incidente ( $E_{incidente}$ ) y la energía absorbida ( $E_{absorbida}$ ) por la superficie.

$$\alpha = \frac{E_{absorbida}}{E_{incidente}} \quad (3)$$

El resultado de la realización de este ensayo es un espectro de absorción, que representa la cantidad de sonido que es capaz de absorber un material. Un aspecto a destacar de este ensayo es que las probetas a ensayar deben tener unas dimensiones preestablecidas para poder introducir las en el tubo de absorción.

### 3. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS OBTENIDAS

#### 3.1. Espectro de rigidez dinámica

Aplicando la metodología correspondiente al ensayo de rigidez dinámica, se obtienen los espectros de rigidez dinámica asociados a las medidas realizadas en cada tipo de mezcla; PA-12, SMA-8 con 1% de polvo de caucho y hormigón pulido. Los espectros representados en la *Figura 4*, se corresponden con la media de los espectros obtenidos para cada probeta de la serie de referencia ensayada, como es el caso de la mezcla tipo SMA-8, de la cual se tomaron medidas en 4 probetas para tener una mayor fiabilidad en los resultados.

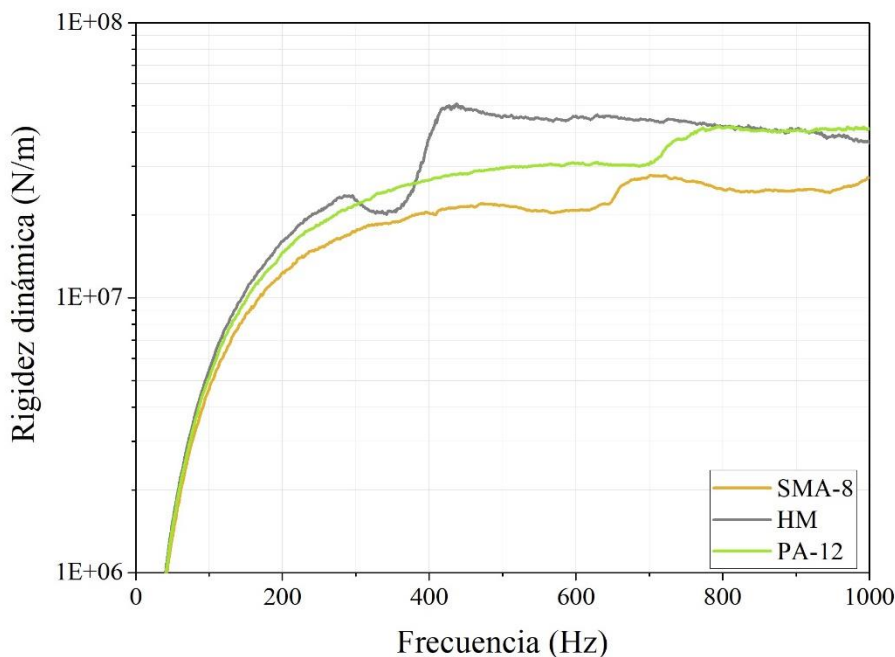


Figura 4.- Espectros de rigidez dinámica obtenidos en laboratorio para las mezclas SMA-8, PA-12 y hormigón pulido.

A partir de los espectros representados es posible realizar una distinción entre las diferentes mezclas. Para ello, se ha seleccionado la frecuencia de 400 Hz ya que, de acuerdo con otros estudios de investigación [9], se afirma que en esta frecuencia la rigidez dinámica puede estar relacionada con el ruido generado entre el neumático y el pavimento.

Los resultados obtenidos muestran que el hormigón pulido es el pavimento más rígido de entre las mezclas ensayadas y, por el contrario, la mezcla tipo SMA-8 con adición de polvo de caucho es la mezcla menos rígida. Teniendo en cuenta la relación existente entre la rigidez dinámica del pavimento y la generación de ruido de rodadura, estos valores indican que la mezcla SMA-8 podría tener un buen comportamiento en relación con la generación del ruido.

#### 3.2. Espectro de textura superficial

Partiendo de los datos de textura arrojados por el perfilómetro láser utilizado y operando con el software MATLAB, se han obtenido los espectros de textura para el rango de frecuencias que engloba la microtextura y la macrotextura. Estos espectros de textura pueden observarse en la *Figura 5*.

Analizando el gráfico que sigue se observa que, tanto en el ámbito de la microtextura (< 0,5 mm) como de la macrotextura (0,5 mm – 50 mm), la mezcla PA-12, caracterizada por tener un porcentaje de huecos elevado, posee una marcada textura superficial, en comparación con las mezclas SMA-8 y el hormigón pulido. La mezcla SMA-8 presenta un mayor nivel de textura para

mayores longitudes de onda, relacionada con la amplitud de los huecos entre los áridos que componen la mezcla. En contraste con las anteriores, el hormigón pulido presenta un nivel de textura más reducido.

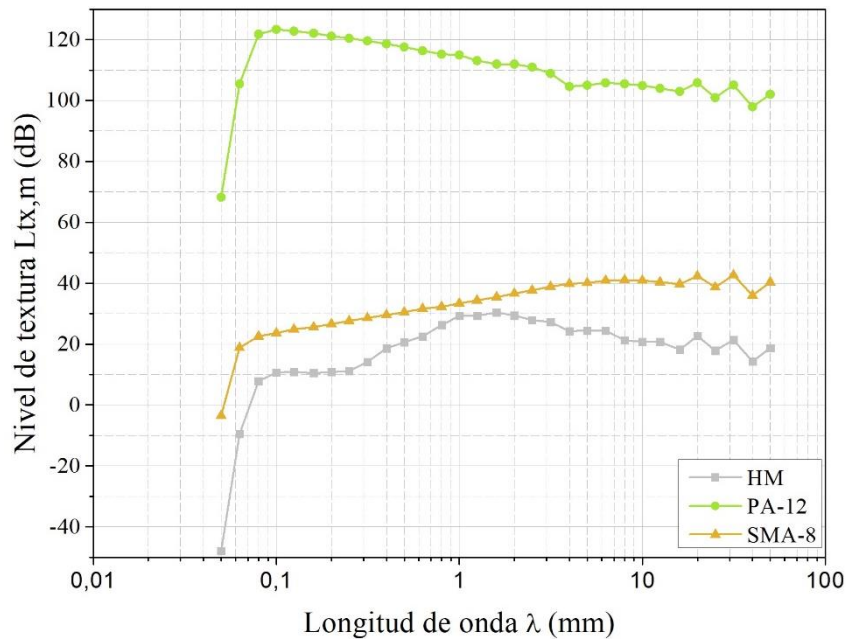


Figura 5.- Espectros de textura obtenidos mediante el software MATLAB para las mezclas tipo PA-12, SMA-8 y hormigón pulido.

La mezcla SMA-8 presenta un mayor índice de textura que el hormigón, pero a su vez mucho más reducido que el de una mezcla porosa. Según la teoría, las mezclas que poseen una macrotextura marcada, pueden contribuir en mayor medida a la generación de ruido en ciertas frecuencias, al existir una mayor fricción entre neumático y pavimento. En el caso de las mezclas SMA-8, al tener una menor textura, disminuirán los niveles de ruido por lo que estos pavimentos pueden tener un mejor comportamiento acústico en determinadas frecuencias del espectro de emisión sonora.

Los resultados obtenidos también pueden observarse visualmente mediante la representación en tres dimensiones de la superficie de las probetas ensayadas que genera el perfilómetro láser. Dichas representaciones de la textura superficial se observan en la Figura 6.

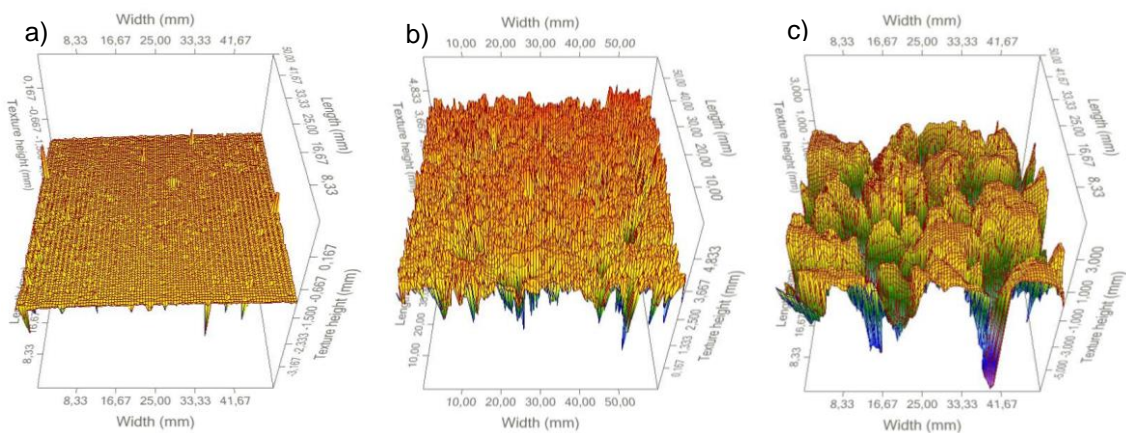


Figura 6.- Representación 3D generada por el perfilómetro láser de la textura superficial de las mezclas a) Hormigón pulido, b) SMA-8 y c) PA-12.

### 3.3. Resistencia al deslizamiento y espectro de emisión sonora asociado

En esta sección se evalúan las diferencias existentes entre las mezclas ensayadas en los valores de resistencia al deslizamiento. Los valores obtenidos se han recogido de manera manual, ya que el péndulo de fricción muestra los resultados en una escala numérica física. Para la presente evaluación, se muestran los valores medios de resistencia al deslizamiento obtenidos en condiciones de pavimento seco y, posteriormente, en condiciones de pavimento húmedo. En la *Tabla 1* se muestran los valores obtenidos.

Tabla 1.- Valores medios de resistencia al deslizamiento en condiciones de pavimento húmedo y seco para las mezclas SMA-8, HM y PA-12.

Condición del pavimento	SMA-8	PA-12	HM
Húmedo	44	35	31
Seco	54	45	41

A la vista de los resultados se observa que la mezcla SMA-8 tiene la mayor resistencia al deslizamiento que las mezclas porosa PA-12 y hormigón pulido. Tanto en pavimento seco como en pavimento húmedo, se ha obtenido idéntica tendencia entre las mezclas, únicamente variando los valores, ya que, en un pavimento mojado, al haber menos adherencia, la resistencia al deslizamiento disminuye.

Con la toma de medidas de ruido mediante sonómetro en combinación con el péndulo de fricción, se tienen los espectros medios de ruido generados por el deslizamiento del péndulo sobre cada una de las mezclas objeto de estudio. Así, es posible comparar la evolución del ruido generado y la resistencia al deslizamiento entre las distintas mezclas. Los espectros de ruido asociados a las mezclas ensayadas se representan en la *Figura 7*.

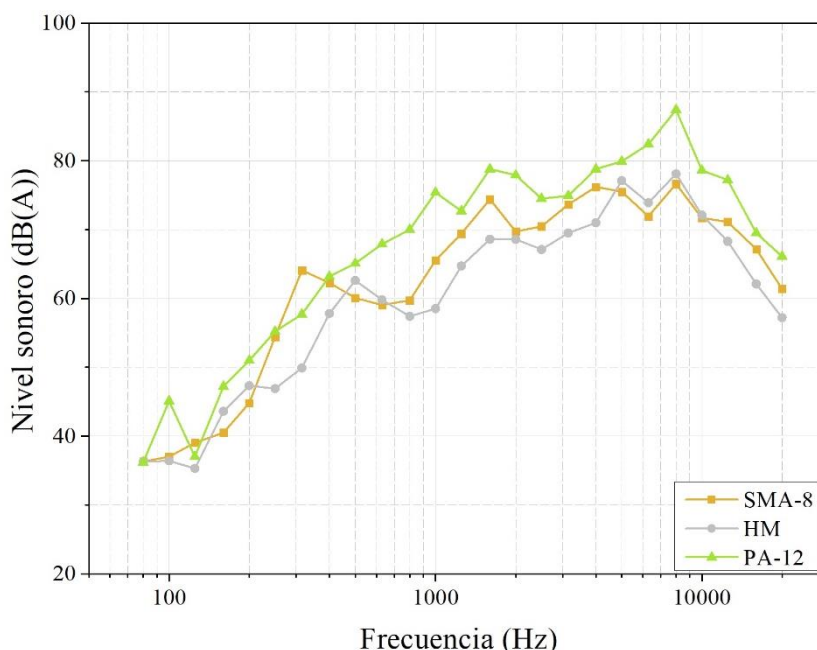


Figura 7.- Espectros de ruido medidos mediante sonómetro de las muestras SMA-8, HM y PA-12 ensayadas.

Atendiendo a los resultados de ruido obtenidos, se observa que las mezclas SMA-8 y PA-12 son las mezclas que generan mayores niveles de ruido por fricción en la mayor parte de las frecuencias mostradas. Es posible relacionar ambas medidas (resistencia al deslizamiento y ruido por fricción) para establecer correlaciones que ayuden a determinar la emisión de ruido de rodadura potencial de una determinada superficie.



### 3.4. Medidas de absorción acústica

Las medidas llevadas a cabo mediante tubo de absorción arrojan el espectro de absorción sonora de cada una de las mezclas objeto de ensayo. Los espectros generados pueden observarse a continuación en la *Figura 8*.

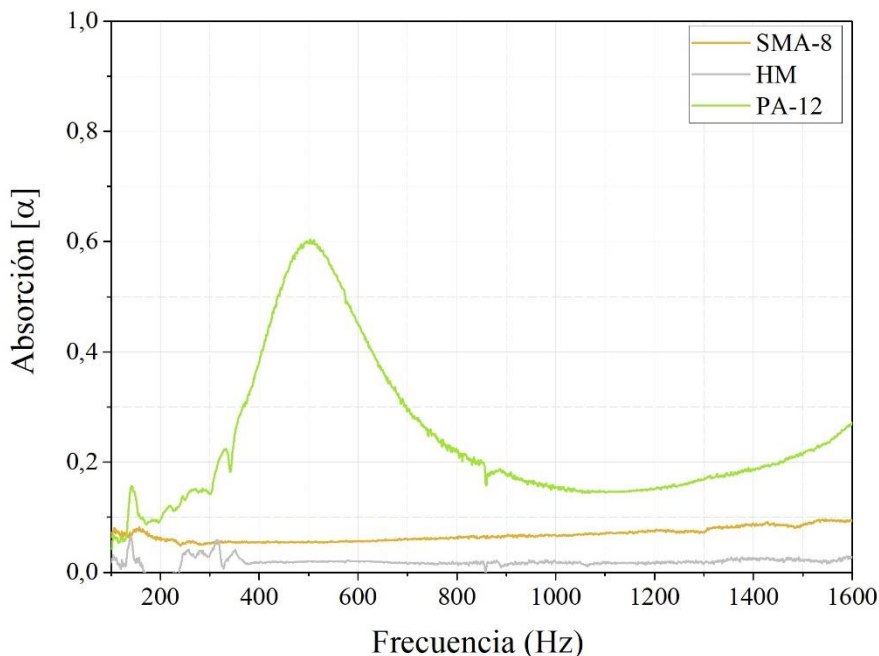


Figura 8.- Espectros de absorción asociados a las mezclas SMA-8, PA-12 y HM ensayadas.

Los resultados desprenden que las mezclas SMA-8 y el hormigón pulido tienen un coeficiente mínimo de absorción, situándose por debajo de 0,1. Por el contrario, la mezcla PA-12 presenta un coeficiente de absorción elevado, en concreto para una frecuencia de 500 Hz, característica propia de las mezclas porosas. En definitiva, la mezcla porosa funcionará como absorbente del ruido y, en su caso, del agua, debido a su elevado contenido en huecos. Por otro lado, las mezclas SMA-8 y el hormigón pulido no poseen la cualidad de absorción del ruido debido a su reducido contenido en huecos.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han mostrado las técnicas y ensayos destinados a la caracterización acústica en laboratorio de materiales de carretera. Las técnicas permiten la evaluación de la rigidez dinámica, la textura superficial, la resistencia al deslizamiento y la absorción acústica. Las principales conclusiones de este trabajo se indican a continuación:

- El ensayo de rigidez dinámica permite determinar diferencias entre mezclas relacionadas con su rigidez y, por lo tanto, identificar las mezclas que pueden generar menor nivel de ruido en el intervalo de medias frecuencias del espectro de emisión sonora.
- La representación del espectro de textura permite definir las longitudes de onda predominantes en un pavimento, las cuales se pueden relacionar con la generación de ruido por mecanismos relacionados con los impactos y vibraciones.
- La resistencia al deslizamiento puede variar en un pavimento en función de sus características. La medición del ruido producido durante este ensayo también aporta información sobre su comportamiento acústico.
- La absorción acústica permite identificar aquellos pavimentos que reducen el ruido una vez producido, así como las frecuencias en las que esa absorción es más marcada.

El estudio en laboratorio de estas características está destinado a conocer en mejor medida las características funcionales de los pavimentos. De este modo, se podrá mejorar su comportamiento y desarrollar los pavimentos del futuro, logrando superficies con características mejoradas y respetuosas con el medio ambiente.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los resultados mostrados en este trabajo son parte del proyecto SBPLY/19/180501/000313 (FEDER) de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.



## 6. REFERENCIAS

- [1] Sandberg, U., 1987. The influence of the road surface and its characterization. Road traffic noise. Applied Acoustics. 21, 97-118.
- [2] Vázquez, V.F., Terán, F., Paje, S.E, 2020. Dynamic stiffness of road pavements: Construction characteristics-based model and influence on tire/road noise. Science of the Total Environment. 736, 136-149.
- [3] Vázquez, V.F., Paje, S.E, 2016. Study of the road surface properties that control the acoustic performance of a rubberized asphalt mixture. Applied Acoustics. 102, 33-39.
- [4] Fahy, F., Walker, J., 2004. Advanced applications in acoustics, noise and vibration. Routledge Taylor & Francis Group, New York.
- [5] ISO 13473-1, 2019. Characterization of pavement texture by use of surface profiles. Part 1: Determination of mean profile depth.
- [6] Vázquez, V.F., García-Hoz, A.M., Gil-Abarca, A., Terán, F., Paje, S.E, 2021. Functional characterization of a cold-in place-recycled pavement at different stages of the curing process. Science of the Total Environment. 789, 148065.
- [7] UNE-EN 13036-4, 2019. Road and airfield surface characteristics. Test methods. Part 4: Method for measurements of slip/skid resistance of a surface. The pendulum test.
- [8] UNE-EN ISO 10534-2, 2002. Acoustics. Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedances tubes. Part 2: Transfer-function method.
- [9] Vázquez, V.F., Paje, S.E. Dynamic stiffness assessment of bituminous mixtures type SMA according construction characteristics. International congress on sound and vibration, Florence, Italy. 12-16 July, 2015.