

## TECNICA NO DESTRUCTIVA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA RIGIDEZ DINÁMICA DE MEZCLAS BITUMINOSAS

PACS: 43.50.Lj

Fernández Vázquez, Victoriano; Terán Sierra, Fernando J.; Paz Núñez, Francisco; Huertas Gallardo, Pedro; 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

Dynamic stiffness of wearing courses could play an important role in the mitigation of tire/road noise. This paper shows the dynamic stiffness results measured in different types of gap-graded bituminous mixtures (SMA and BBTM). These measurements were conducted in both laboratory and *in situ* conditions. On the other hand, the relation between the binder content of the mixtures and their dynamic stiffness will be also studied on BBTM mixtures. The Young modulus will be also achieved by means of a theoretic model and the dynamic stiffness measurements carried out.

### RESUMEN

La rigidez dinámica de una capa de rodadura es uno de los mecanismos que puede participar en la mitigación del ruido de rodadura. En este trabajo se presentan los resultados de rigidez dinámica de varios tipos de mezclas bituminosas discontinuas (SMA y BBTM) en medidas realizadas *in situ* y en laboratorio sobre testigos. Por otro lado, se estudia la relación entre el contenido de ligante y la rigidez dinámica de varias mezclas bituminosas BBTM y se obtiene su módulo de Young a partir de un modelo teórico y de los datos de rigidez dinámica determinados en laboratorio.

### INTRODUCCIÓN

La rigidez dinámica de la capa de rodadura de un pavimento, o su equivalente, la impedancia mecánica, es una propiedad estructural relacionada con la vibración de dicha superficie, y por tanto, con el ruido de rodadura generado por el propio tráfico. Según algunos autores, una considerable reducción de la rigidez dinámica de la superficie del pavimento podría llevar a reducciones del ruido de rodadura de hasta 5 dB(A). Dicha reducción estaría concentrada en las medias frecuencias del espectro de ruido de rodadura, es decir, en la zona donde toma los valores máximos.

La rigidez dinámica de la capa de rodadura de un pavimento se ha revelado como una característica estructural, aún no suficientemente estudiada, cuya modificación podría reducir considerablemente el ruido de rodadura generado en la interacción entre el neumático y el pavimento.

Generalmente los materiales convencionales empleados en la construcción de carreteras presentan una rigidez dinámica muy superior a la de los neumáticos, sin embargo, según algunos autores, se podría conseguir una importante reducción en la emisión de ruido si se diseñasen mezclas con una rigidez dinámica del mismo orden de magnitud que los neumáticos [1, 2]. En la Figura 1 se muestra la rigidez dinámica típica que puede encontrarse en una mezcla bituminosa en caliente y en un neumático. Los gráficos mostrados corresponden a ensayos realizados por el Laboratorio de Acústica Aplicada a la Ingeniería Civil (LA<sup>2</sup>IC) sobre una mezcla SMA en caliente y sobre el neumático de referencia Pirelli P6000 empleado en los ensayos CPX desarrollados por dicho laboratorio.

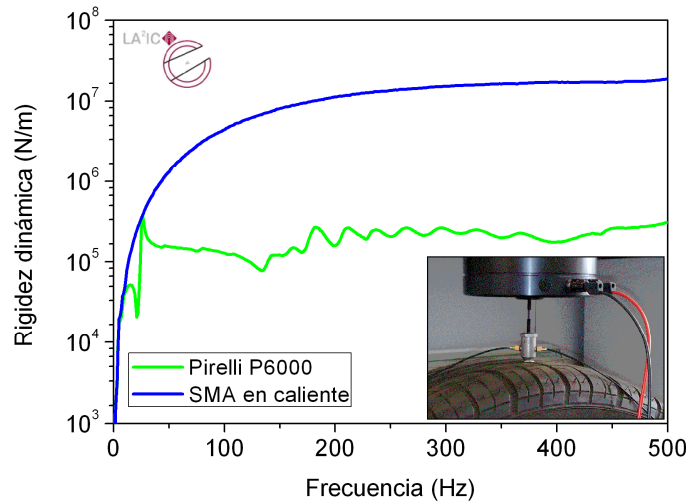


Figura 1. Rigidez dinámica de una mezcla bituminosa en caliente y de un neumático

### TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Tanto la rigidez dinámica como la impedancia mecánica son características de una estructura (probeta de mezcla bituminosa o capa de rodadura). Estas magnitudes relacionan, en términos de números complejos, los vectores fuerza y movimiento de una superficie, la cual se encuentra solicitada por una fuerza dinámica.

La determinación de los espectros de rigidez dinámica se ha realizado mediante el método no resonante [3] directamente sobre la cara superior de las probetas. El equipo de ensayo cuenta con los siguientes elementos: una cabeza de impedancia, la cual registra las señales fuerza y movimiento de la superficie estudiada; un excitador de vibraciones, encargado de realizar la excitación; un amplificador que acondiciona la señal; y un sistema multi-analizador que se encarga de generar y registrar las señales fuerza y movimiento. A partir de estas señales se 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.

El método no resonante, con el cual se han realizado las mediciones, permite obtener el espectro de rigidez dinámica de las mezclas bituminosas estudiadas, así como el de la impedancia mecánica. Estos espectros permitirán comparar las distintas mezclas bituminosas de acuerdo a sus características constructivas. Por otro lado, y gracias a un modelo teórico, se determinará el módulo de Young mediante la minimización de una función objetivo  $\Delta(E)$ , donde se cuantifica la desviación de los valores de impedancia mecánica teóricos ( $Z_R$ ) de los valores medidos ( $Z_m$ ) por el equipo sobre probetas.

$$\Delta(E) = \sqrt{\sum_{i=1}^n |Z_R(\omega_i) - Z_m(\omega_i)|^2}$$

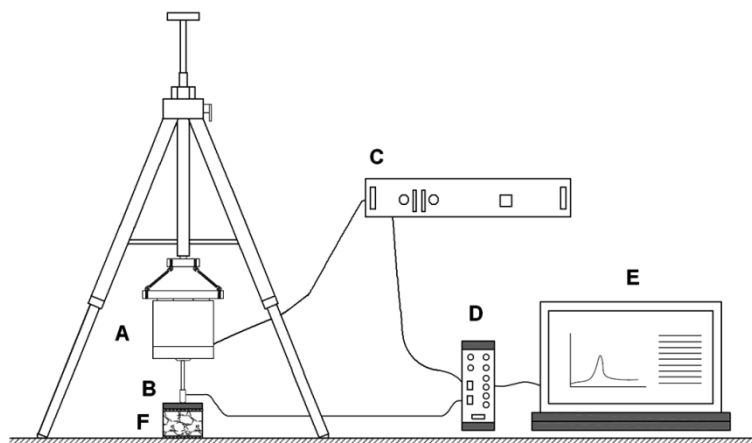


Figura 2. Esquema del equipo para la determinación de la rigidez dinámica: A) excitador de vibraciones, B) cabeza de impedancia, C) amplificador, D) analizador multicanal, E) ordenador portátil, F) probeta

### 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.

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 [4]. Para cada uno de los tipos de mezcla bituminosa se ha dispuesto de un juego de 4 probetas de características similares, de modo que se obtenga reproducibilidad en los resultados obtenidos. A parte de las mezclas SMA, se han ensayado mezclas BBTM 11A con distinto contenido de ligante. Las mezclas BBTM son mezclas extendidas en capas muy finas.

Por último, se han realizado medidas de rigidez dinámica *in situ* sobre dos tramos de mezcla BBTM 11A con y sin alto contenido en polvo de caucho añadido por vía húmeda. Los tramos experimentales están situados en la zona periurbana de Tomelloso, y está compuesto por dos carriles, uno por sentido de la marcha. El tramo, originalmente construido con una mezcla del tipo AC 16 surf S, se rehabilitó con una mezcla bituminosa discontinua BBTM 11A de 3 cm de espesor. La mezcla se diseñó con polvo de caucho añadido por vía húmeda, en un contenido del 20 % por peso del ligante (1,5 % respecto del peso total de la mezcla). La mezcla de referencia (sin alto contenido en polvo de caucho) permite contrastar el efecto del polvo de caucho en el comportamiento acústico de la nueva mezcla.

Las mezclas que se han ensayado en este trabajo, junto con sus características, se muestran en la Tabla 1. Todas las probetas han sido fabricadas en laboratorio y se han moldeado en probetas cilíndricas de 60 mm de altura y 100 mm de diámetro aproximadamente.

Tabla 1. Tipos de mezclas estudiadas

Mezcla	Característica
SMA8-PH0	TMA 8 mm, PMB, alto contenido en huecos
SMA8-RH0	TMA 8 mm, Polvo de caucho añadido por vía seca
SMA11-PH0	TMA 11 mm, PMB
SMA11-PH0-H	TMA 11 mm, PMB, alto contenido en huecos
SMA11-PH0-L	TMA 11 mm, PMB, alto contenido en ligante
SMA11-CH0	TMA 11 mm, betún convencional
SMA11-RH0	TMA 11 mm, polvo de caucho añadido por vía seca
SMA11-PW0	TMA 11 mm, PMB, mezcla templada
SMA11-PC0	TMA 11 mm, emulsión PMB, mezcla en frío
SMA16-CH0	TMA 16 mm, betún convencional
SMA16-PH0	TMA 16 mm, PMB
SMA11-R*H0	TMA 16 mm, polvo de caucho añadido por vía húmeda
SMA16-CH10	TMA 16 mm, betún convencional, RAP 10%
SMA16-CH20	TMA 16 mm, betún convencional, RAP 20%
BBTM11-PH0-4.5L	TMA 11 mm, PMB, ligante 4,5%
BBTM11-PH0-5.5L	TMA 11 mm, PMB, ligante 5,5%
BBTM11-PH0-6.0L	TMA 11 mm, PMB, ligante 6,0%

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### Rigidez Dinámica de mezclas SMA.

Se han ensayado las mezcla bituminosa tipo SMA incluidas en la Tabla1. Para cada mezcla se han obtenido cuatro espectros de rigidez dinámica, uno por probeta ensayada. En la Figura 3 se muestran los espectros de rigidez dinámica de varias de las mezclas estudiadas. Los resultados se representan en un intervalo de frecuencias hasta 500 Hz [5].

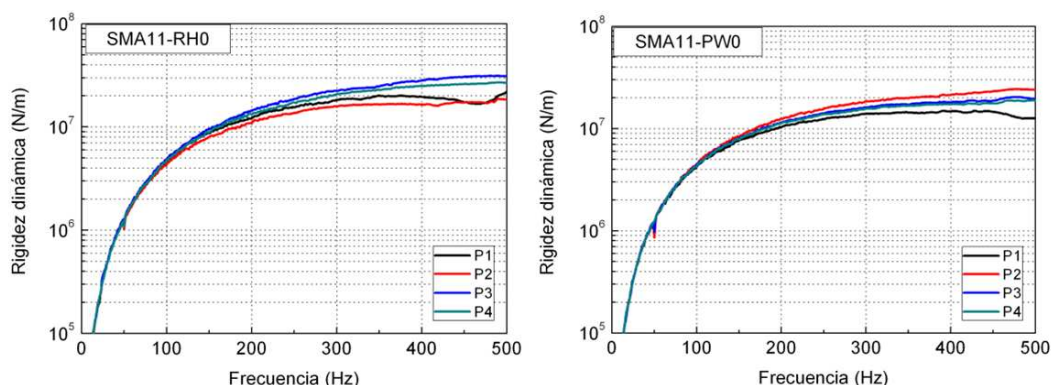


Figura 3. Espectros de Rigidez dinámica

De los espectros mostrados en las figuras anteriores, se ha seleccionado el valor de la rigidez dinámica a la frecuencia de 400 Hz, ya que esta frecuencia puede estar relacionada con los niveles de ruido de rodadura, de acuerdo a la bibliografía consultada [6, 7]. De los cuatro valores de rigidez dinámica obtenidos para cada tipo de mezcla bituminosa, se eliminó el de mayor desviación estándar, y se determinó la media y los valores de error del resto de probetas. En la Figura 4 se muestran estos valores medios y las barras de error resultantes. Los resultados se muestran por grupos, comparando distintas características de las mezclas:

- Tamaño máximo de árido: 8, 11 y 16 mm
- Tipo de ligante: PMB, convencional y con NFU por vía húmeda
- Temperatura de fabricación: Caliente, templada y fría
- Contenido de RAP: 0%, 10% y 20 %
- Contenido en huecos: 4,4% y 20,3%
- Contenido en ligante: 6% y 9%

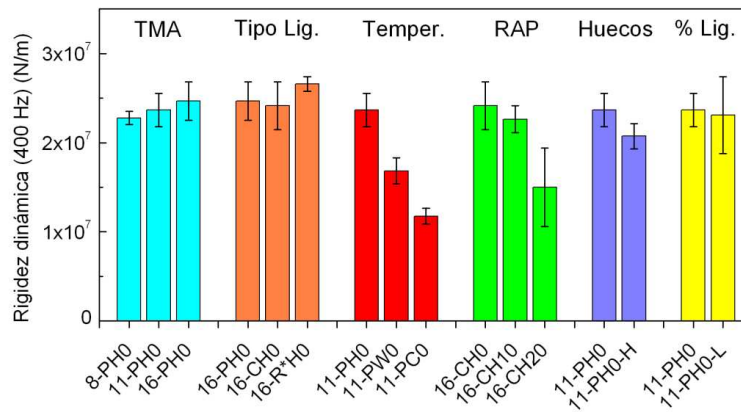


Figura 4. Espectros de Rigidez dinámica

Como se muestra en la figura, el tamaño máximo de árido (TMA) parece no tener un papel determinante en el incremento de la rigidez dinámica de las probetas. Para TMA inferiores (8 mm) se obtiene una rigidez dinámica menor, sin embargo, esta mezcla (SMA8 – PH0) tenía un alto contenido en huecos, el cual podría reducir la rigidez. Tampoco se pueden obtener resultados concluyentes en el caso de la comparación por tipo de ligante, aunque de acuerdo a los resultados mostrados las mezclas con polvo de caucho añadido por vía húmeda parecen más rígidas.

En la comparación de las mezclas considerando como variable la temperatura de ejecución sí que se pueden obtener resultados interesantes, ya que se observa una clara relación entre las mezclas fabricadas a menor temperatura y el descenso de la rigidez dinámica de las mismas. Una dependencia similar se ha encontrado en el caso de las mezclas fabricadas con material reciclado; las mezclas con mayor porcentaje de RAP son las que menor rigidez presentan. Este comportamiento se ha observado también al aumentar el porcentaje de huecos en mezcla: a mayor contenido en huecos, menor rigidez dinámica.

Por último, de acuerdo con los resultados mostrados, el incremento en el porcentaje de ligante podría llevar a una reducción de la rigidez dinámica, sin embargo, en este caso el error obtenido en las mediciones es tan elevado que no permite establecer conclusiones en este sentido.

#### Relación entre rigidez Dinámica y contenido de ligante en mezclas BBTM 11A.

Además de las mezclas SMA, también se han estudiado probetas de mezcla discontinua tipo BBTM con el objetivo de evaluar cómo afecta el contenido de ligante en la rigidez dinámica de este tipo de mezclas bituminosas (Figura 5). En este caso el procedimiento ha sido similar al llevado a cabo con las mezclas SMA. Este estudio permitirá establecer si existe alguna relación entre el contenido de ligante y la rigidez dinámica; relación que no se ha podido establecer de forma definitiva con las mezclas SMA.

En el caso de las mezclas BBTM con betún modificado con polímeros (BBTM11-PH0) parece que el incremento en el contenido de ligante puede llevar a un aumento de la rigidez dinámica. De acuerdo a los resultados mostrados, la rigidez dinámica aumenta cuando se incrementa el porcentaje de ligante en mezcla, sin embargo, este incremento debe tener un máximo, a partir del cual la rigidez dinámica debe caer si se sigue aumentando el porcentaje de ligante en mezcla. En los ensayos realizados sobre la mezcla BBTM11-PH0 no se ha llegado hasta este máximo en el contenido de ligante, tal y como se observa en la Figura 5.

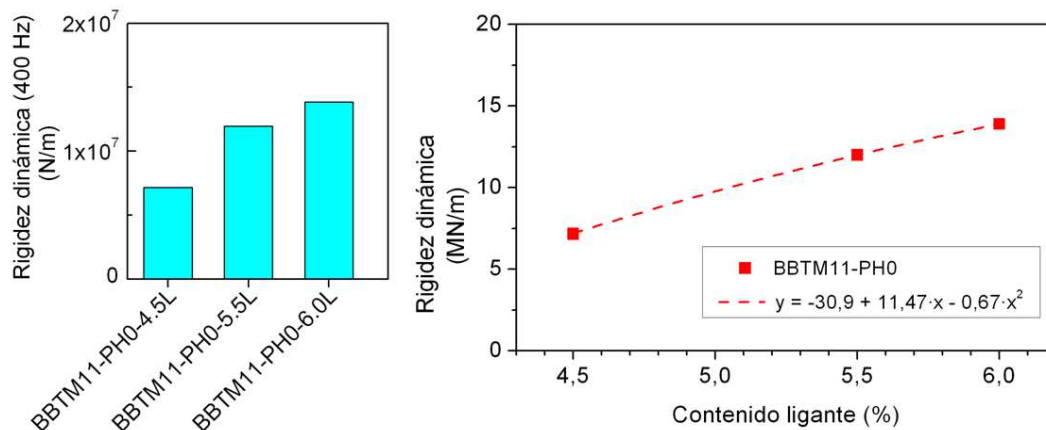


Figura 5. Rigidez dinámica a 400 Hz de mezclas BBTM 11A (izquierda) y relación con el contenido de ligante (derecha).

### Relación medidas in situ y sobre testigos.

Se han realizado medidas de rigidez dinámica *in situ*, sobre un tramo experimental situado en la localidad de Tomelloso (CM-3102). En este caso la mezcla estudiada fue una mezcla discontinua tipo BBTM 11A con tamaño máximo de árido 11 mm y betún de alta viscosidad con alto contenido en polvo de caucho añadido por vía húmeda (BBTM 11A NFU). Por otro lado, se extrajeron varios testigos cilíndricos en los puntos exactos donde se realizaron los ensayos de rigidez dinámica, con el fin de comparar los resultados obtenidos *in situ* y en laboratorio sobre testigos. Los testigos fueron posteriormente cortados y adaptados a la geometría de las probetas ensayadas en laboratorio.

Además de los ensayos realizados sobre la mezcla bituminosa discontinua BBTM 11A NFU, se realizaron mediciones sobre un tramo de referencia [8], en este caso con una mezcla de similares características (BBTM 11A) pero con betún convencional, sin polvo de caucho (REFERENCIA). Los resultados obtenidos en cada tipo de mezcla permitirán establecer la relación existente entre los valores de rigidez dinámica obtenidos *in situ*, y los obtenidos sobre probetas para este tipo de mezclas. En la Figura 6 (izquierda) se muestran los resultados obtenidos.

Es interesante destacar la presencia de saltos en el espectro de rigidez dinámica para algunas frecuencias (medidas en testigos). Estos saltos pueden deberse a las condiciones de apoyo de la probeta/testigo y a la existencia de resonancias a determinadas frecuencias que podrían alterar los valores reales a esas frecuencias.

Como conclusión, es más adecuado realizar ensayos de rigidez dinámica *in situ* que sobre probetas, aunque en la mayoría de los casos los ensayos *in situ* no se podrán llevar a cabo por la dificultad y el tiempo que conlleva su ejecución (cortes de tráfico, fijación del equipo).

A partir de los resultados obtenidos *in situ* y sobre testigos (tomados en los puntos exactos donde se realizaron los ensayos *in situ*), se puede hacer una comparación entre ambos valores medidos sobre mezclas bituminosas en caliente. Esta comparación se ha realizado para los valores de rigidez dinámica a 400 Hz, que es la frecuencia que se ha tomado en los apartados anteriores para el estudio de la rigidez dinámica (Figura 6 derecha).

A partir de los resultados mostrados en la figura anterior se observa que los valores de rigidez dinámica obtenidos en los ensayos *in situ* son notablemente superiores a los valores obtenidos en los ensayos sobre probetas. Este comportamiento debe ser debido a la restricción que impone al movimiento el conjunto de la superficie de la carretera al ser solicitada durante los ensayos. Sin embargo, en el caso de las probetas, la falta de confinamiento lateral puede llevar a un mayor desplazamiento de la superficie, y por tanto, a una reducción de la rigidez dinámica. Por otro lado, de acuerdo a los resultados obtenidos, puede establecerse una relación empírica entre los resultados obtenidos sobre probetas e *in situ*, para este tipo de materiales (mezclas bituminosas BBTM 11A).

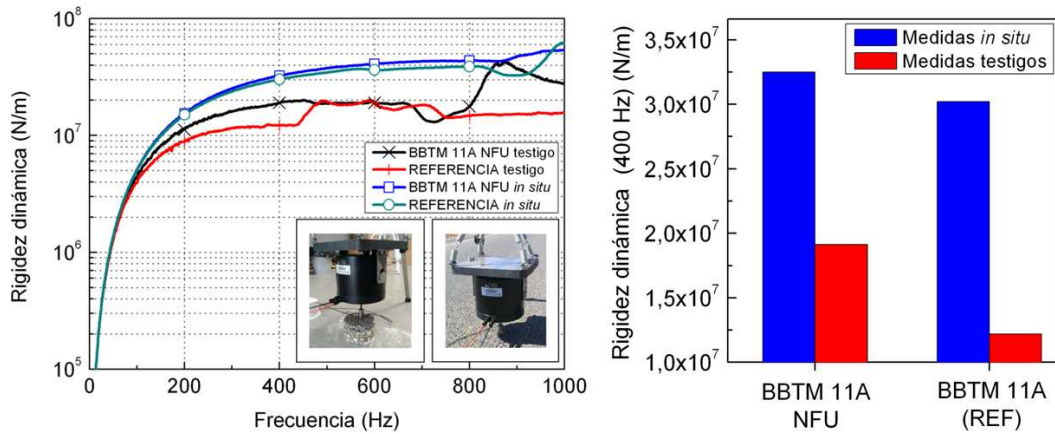


Figura 6. Rigidez dinámica *in situ* (izquierda) y comparación entre las medidas de rigidez dinámica *in situ* y sobre probetas (derecha).

### Estimación del módulo de Young de mezclas bituminosas.

Además de la determinación del espectro de rigidez dinámica de los materiales anteriores, el equipo excitador de vibraciones y la cabeza de impedancia permiten la estimación del módulo de Young ( $E$ ) a partir del ajuste basado en un modelo teórico [9]. En la Figura 7 se muestra el ajuste realizado para la mezcla SMA8-PH0.

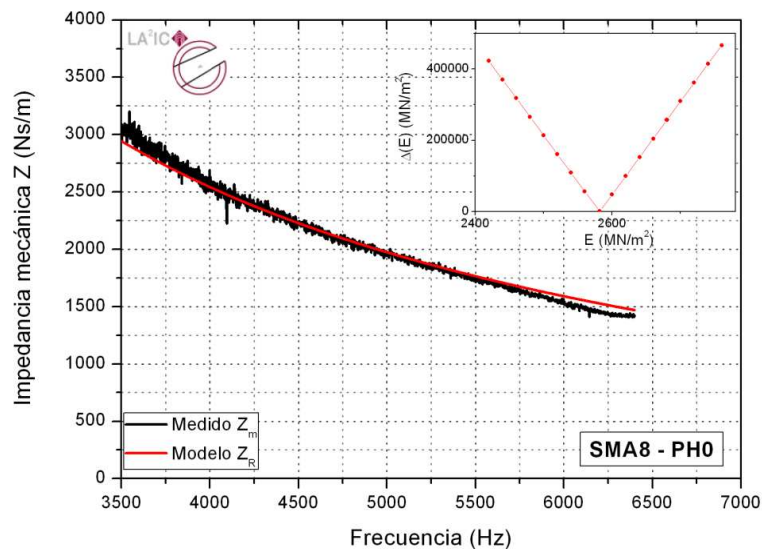


Figura 7. Ajuste del espectro de impedancia mecánica para la estimación del módulo de Young.

Mediante el ajuste de la curva de rigidez dinámica y el valor estimado teóricamente, se obtienen los valores de  $E$  en cada tipo de mezcla (4 probetas). Al igual que para los valores de rigidez dinámica, se ha eliminado el valor más distanciado de la media de cada juego de probetas, quedando los resultados que se muestran en la Figura 8.

Los resultados mostrados en la Figura 8 se han comparado con los obtenidos de acuerdo a la norma UNE-EN 12697-26 sobre *Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, Parte 26: Rigidez*, comprobándose que existe una buena relación entre los valores obtenidos mediante la norma y los obtenidos mediante el modelo teórico.

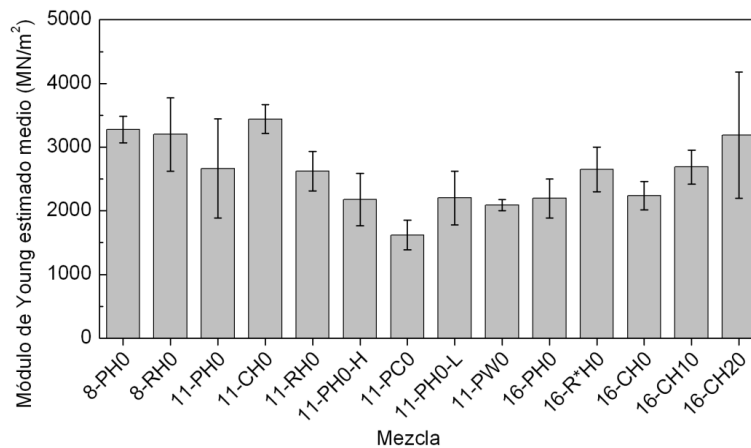


Figura 8. Valores estimados medios del módulo de Young y desviación típica.

## CONCLUSIONES

La rigidez dinámica es una característica de las mezclas bituminosas que puede tener cierta relevancia en la generación de ruido de rodadura, especialmente en el caso en los que se consigue reducir su valor de forma importante. De acuerdo a los datos mostrados, la temperatura de fabricación de las mezclas bituminosas es la característica que más puede influir sobre la rigidez dinámica final del pavimento. Por otro lado, se ha observado la relación existente entre el contenido en ligante de la mezcla y su rigidez dinámica, de una mezcla tipo BBTM 11A, aunque no se ha obtenido el porcentaje de ligante que hace máxima la rigidez dinámica. Se han obtenido valores de rigidez dinámica en condiciones *in situ*, mostrando valores mayores y más representativos que los obtenidos sobre probetas. Por último, se ha aplicado un modelo para la determinación del módulo de Young a partir de los ensayos de rigidez dinámica, con resultados satisfactorios.

## 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 y a la Conserjería de Ciencia y Tecnología de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (Proyecto PPII-2014-012-A).

## REFERENCIAS

- [1] K.P. Biligiri, B. Kalman, A. Samuelsson. *Understanding the fundamental material properties of low-noise poroelastic road surfaces*. International Journal of Pavement Engineering, 14 (2013), 13-23.
- [2] U. Sandberg, J.A. Ejsmont, *Tyre/road noise reference book*, Informex, Sweden, (2002).
- [3] Lauge Fulgsang Nielsen, *Improved method for complex modulus estimation*. Brüel & Kjaer application note.
- [4] V.F. Vázquez, S.E. Paje, *Caracterización de mezclas bituminosas mediante diferentes técnicas de ensayo: Rigidez dinámica mediante diferentes técnicas de ensayo: Rigidez dinámica, CPX y Absorción acústica*. TecniAcústica (2013), Valladolid.
- [5] V.F. Vázquez, *Evaluación de la Rigidez Dinámica y Caracterización Acústica de Mezclas Bituminosas*, PhD thesis, ETSI de Caminos, Canales y Puertos de Ciudad Real – Universidad de Castilla-La Mancha (España), (2015).
- [6] A.H.W.M. Kuijpers, W. Schwanen. *Development of a measurement system for mechanical impedance*. Silvia Project Report (2005).
- [7] Mingliang Li. *Tyre – Road noise, Surface Characteristics and material properties*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft (Holanda), (2013).
- [8] 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, 13 (2014), 2487-2495.
- [9] Huebelt, J. Lindemann, U. Zander, F. Wellner. *Young's Modulus and Mechanical Impedance of Road Pavements*. InterNoise (2013) Innsbruck.