

Comportamiento de mezclas asfálticas densas a partir del ensayo de viga semicircular simplemente apoyada

Behavior of dense asphalt mixtures by the simply supported semicircular beam

LUIS ALBERTO PAREDES CHÉRREZ

Ingeniero Civil. Auxiliar de Investigación, Programa de Ingeniería Civil, Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: u1100719@unimilitar.edu.co

ÓSCAR JAVIER REYES ORTIZ

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Titular, Programa de Ingeniería Civil, Líder Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: oscar.reyes@unimilitar.edu.co

JAVIER FERNANDO CAMACHO TAUTA

Ingeniero Civil, Doctor. Profesor Asociado, Programa de Ingeniería Civil, Investigador Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia.

Contacto: javier.camacho@unimilitar.edu.co

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de aceptación: 23 de noviembre de 2013

Financiamiento: Universidad Militar Nueva Granada

Palabras clave: asfaltitas, asfalto reciclado, energía disipada ensayo Fénix, ensayo SCB.

Key words: Asphaltite, asphalt, energy dissipation, Fénix test, SCB test, RAP.

RESUMEN

La caracterización mecánica y dinámica de mezclas asfálticas es costosa y demorada por la complejidad y el número de ensayos necesarios para su ejecución. Sin embargo, algunas investigacio-

nes han tratado de establecer correlaciones con ensayos más sencillos, rápidos y económicos. Por esta razón, el objetivo principal de esta investigación fue establecer la viabilidad del uso del ensayo de Viga Semicircular Simplemente Apoyada (SCB) en la caracterización de mezclas asfálticas

cerradas con granulometrías del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) y del Instituto Nacional de Vías (Invias), con diferentes propiedades. El estudio inició con la fabricación de probetas SCB con diferentes materiales (agregados, asfaltos, asphaltita, asfalto reciclado y cal) y procesos de compactación (vibrocompactación y con prensa giratoria). Los ensayos se realizaron a una velocidad de 1 mm/min, una temperatura de 15°C y con la medición de los parámetros carga máxima, desplazamiento a carga máxima, energía liberada durante el proceso de fisuración, índice de rigidez a tracción e índice de tenacidad y variables definidas en el ensayo Fénix. De los resultados obtenidos, se pudo establecer que irrelevantemente del material empleado, el periodo de envejecimiento, el nivel de compactación y el reemplazo de *filler*, el ensayo SCB y los parámetros calculados evidencian el comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas y plantear su uso como herramienta.

ABSTRACT

Mechanic characterization of asphalt mixtures uses to be expensive and time consuming. How-

* * *

INTRODUCCIÓN

La mezcla asfáltica es el material más utilizado en la ingeniería de pavimentos; está constituido por asfalto, agregados pétreos y aditivos en diferentes proporciones. Los porcentajes de los materiales en la mezcla afectan el comportamiento mecánico y dinámico de esta y por ende su vida útil (Papagiannakis y Masad, 2008). Existen en el estado del arte múltiples ensayos de laboratorio que brindan la posibilidad de cuantificar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como módulo dinámico (MD), resistencia a la tracción indirecta (RTI), fatiga y ahuellamiento, entre otros (AENOR, 2007). Sin embargo, su ejecución, análisis y costo es elevado, lo que hace en muchos casos la búsqueda de nuevos procedi-

ever, some researches try to correlate such properties by simple, fast and less expensive tests. The main goal of this investigation consisted into establish the viability of use the simply supported semicircular beam (SCB) to characterize dense asphalt mixtures designed under specifications of the Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) and the Instituto Nacional de Vías (Invias). The study started with the production of SCB specimens using different materials (soil aggregate, asphalt, asphaltite, reclaimed asphalt pavement and lime) and compaction techniques (vibration and gyratory compaction). The SCB tests were carried at a velocity of 1mm/min and 15°C of temperature. From these tests, different parameters were obtained based on the definition in the Fénix test (maximum load, displacement at maximum loading, energy released during the cracking process, traction stiffness index and tenacity index). From the results, it was found that the SCB tests were useful as a tool to characterize the mechanical properties of the asphalt mixtures. This conclusion is applicable for all kind of mixtures tested, ageing periods, compaction level and *filler* content.

mientos y ensayos más económicos y en menor tiempo, pero igual de eficaces y eficientes que los enunciados anteriormente (Molenaar *et al.*, 2002; Valdes *et al.*, 2009; Pérez *et al.*, 2001).

El ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB, acrónimo en inglés de Semi-Circular Bending) fue desarrollado en Australia por Lim, I. L., Johnston, I. W. y Choi, S. K. para estudiar las fracturas en la mecánica de rocas (1993). Posteriormente, las técnicas del SCB se emplearon para estudiar la resistencia al agrietamiento y la fractura de mezclas asfálticas en Estados Unidos por Molenaar, J., Lui, X. y Molenaar, A. (2003). Con base en los resultados obtenidos y la simplicidad de la metodología del ensayo, se ha generado y proporcionado una plataforma adecuada

para que múltiples investigadores caractericen las propiedades de fractura y fatiga de mezclas asfálticas con diferentes condiciones (Papagiannakis y Masad, 2008; Prapoorna *et al.*, 2012; Li y Marasteanu, 2010; Arabandi y Ferdowsi, 2009).

El ensayo SCB es un procedimiento rápido, preciso y confiable, el cual permite conocer la carga máxima (F_{max}) y el desplazamiento a la carga máxima (ΔF_{max}), que podrá ser capaz de resistir una mezcla asfáltica en la capa de pavimento antes de llegar a la falla. Así mismo, Valdés, Pérez y Botella (2011), en el desarrollo del ensayo Fénix, plantearon los parámetros de la curva carga-desplazamiento, donde muestran el comportamiento frente a la fatiga y la fractura de las mezclas asfálticas, como el índice de rigidez a la tracción (IRT), el índice de tenacidad (IT), la energía elástica ($W F_{max}$) y de fluencia (Ws), y carga máxima (F_{max}), entre otras.

El procedimiento del ensayo SCB consiste en fabricar muestras cilíndricas mediante el compactador Marshall o el compactador de prensa giratorio para, posteriormente, cortarlos en dos partes iguales, de esta manera se obtienen dos semicírculos (figura 1). A continuación se realiza una entalladura de aproximadamente 3 mm en la mitad de la muestra, cuyo



Figura 1. Muestras para ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

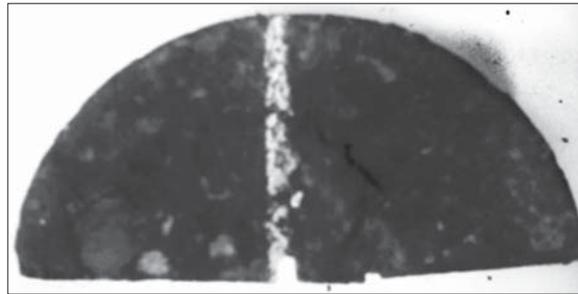


Figura 2. Muestra con entalladura

Fuente: elaboración propia.

objetivo es inducir el plano de falla durante el ensayo (figura 2) (Arabandi y Ferdowsi, 2009).

Acto seguido, se coloca la muestra centrada y simplemente apoyada en el dispositivo para el ensayo, el cual establece que exista una distancia entre apoyos igual al 80 % de la longitud del diámetro (figura 3) (Arabandi y Ferdowsi, 2009). Finalmente, se aplica una carga constante en el centro de la luz de la muestra hasta llegar a la falla, a una velocidad de 50 mm/min y a una temperatura preestablecida (figura 4) (Molenaar *et al.*, 2003).

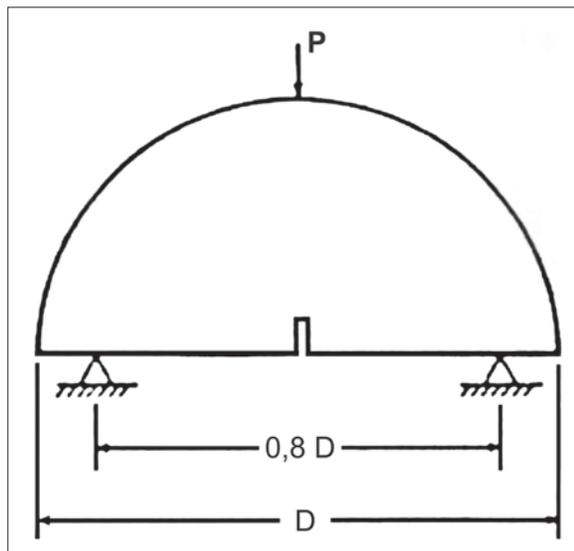


Figura 3. Esquema del dispositivo y la muestra para ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

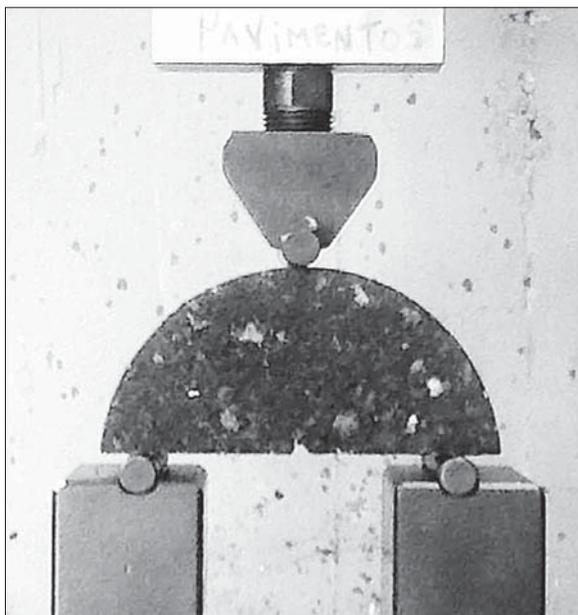


Figura 4. Muestra y dispositivo utilizado en el ensayo SCB

Fuente: elaboración propia.

El resultado final del ensayo consiste en establecer la curva carga-desplazamiento, de la cual se obtiene la carga máxima y el desplazamiento a carga máxima, variables para estudiar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas ensayadas.

Estudios realizados por Molenaar, Scarpas, y Liu (2002) concluyen que el ensayo SCB puede ser usado para caracterizar las fracturas y esfuerzos sufridos en mezclas asfálticas con buena repetitividad. Además, encontraron que los valores de la resistencia a la tensión obtenida por diferentes métodos (RTI, UniaxialTensile Test, y SCB) no varía significativamente, haciendo posible el uso del ensayo SCB para cuantificar esta propiedad y correlacionarla con los demás ensayos.

Por otro lado, investigaciones realizadas en Irán por M. Arabandi y B. Ferdowsi (2008), concluyeron que el ensayo SCB puede ser usado para caracterizar los esfuerzos a tracción de mezclas

asfálticas en caliente con buena repetitividad. Además, manifiestan que la forma de la falla desarrollada en el ensayo es de gran utilidad, pues es similar al Modo I de fallo de la mecánica de fracturas y que es aplicable incluso a temperaturas elevadas cuando el material se comporta de manera visco-elástica, haciendo viable establecer el comportamiento de las mezclas asfálticas con la teoría de la mecánica de fracturas.

Por otra parte, el ensayo Fénix desarrollado por la Universidad Politécnica de Cataluña utiliza igualmente probetas semicirculares para establecer las propiedades mecánicas y dinámicas de mezclas asfálticas; sin embargo, este ejecuta la carga a tensión. El resultado del ensayo consiste en obtener la curva carga-desplazamiento (figura 5) y, de esta, determinar los parámetros que definen el comportamiento de una mezcla asfáltica y que se definen a continuación (Valdes, 2011):

Carga máxima (F_{max}) [kN]: se define como la carga máxima registrada en el ensayo.

Desplazamiento a carga máxima (ΔF_{max}) [mm]: se define como el desplazamiento registrado desde el inicio de la carga hasta que alcanza la carga máxima.

Desplazamiento al 50% F_{max} prepico (Δ_m) [mm]: se define como el desplazamiento correspondiente a la mitad de la carga máxima alcanzada, antes del pico.

Desplazamiento al 50% F_{max} postpico (Δ_{mdp}) [mm]: se define como el desplazamiento registrado por la muestra una vez que la carga ha caído a la mitad del valor de su carga máxima. Este parámetro indica la capacidad que tiene la mezcla evaluada de admitir desplazamientos, puesto que a medida que las mezclas son más dúctiles, y por ende más deformables, se obtienen mayores valores de Δ_{mdp} , mientras que para mezclas más frágiles se obtienen menores valores de Δ_{mdp} .

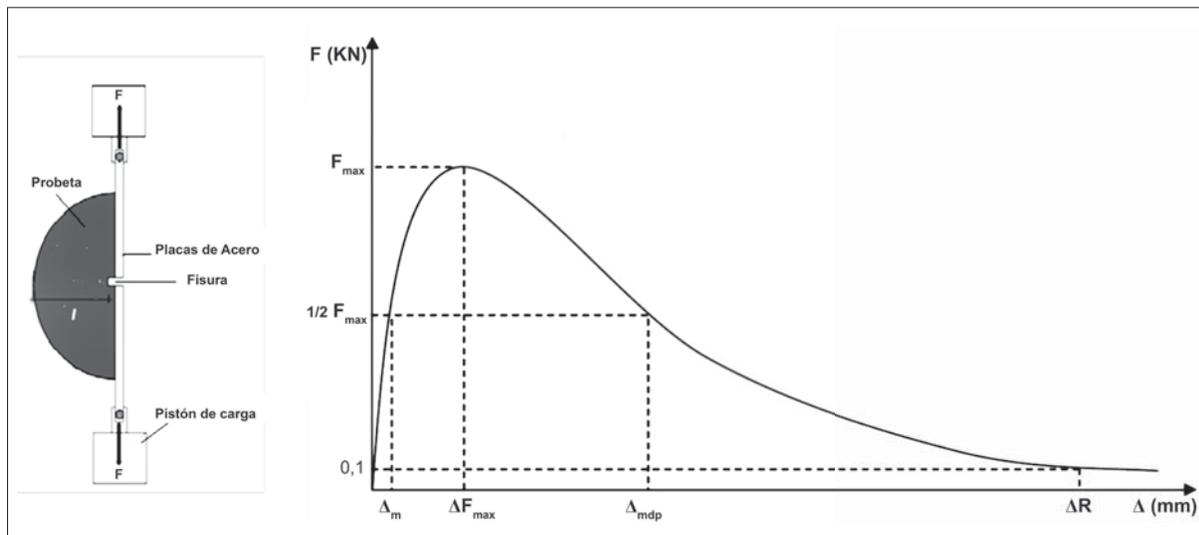


Figura 5. Curva Carga-Deformación del ensayo SCB

Fuente: Valdés (2011).

Energía total (W_D) [kN-mm]: trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo la curva F- Δ .

Energía Elástica ($W_{F_{max}}$) [kN-mm]: trabajo realizado hasta la carga máxima, área prepico.

Energía de Fluencia (W_S) [kN-mm]: trabajo realizado en la zona de ablandamiento, área postpico.

Índice de rigidez a la tracción (I_{RT}) [kN/mm]: se define como la relación entre la mitad de la carga máxima, $1/2 F_{max}$, y el desplazamiento a la carga máxima, Δ_m . Este índice muestra una pseudo-rigidez del material, mostrando qué tan flexible o rígida es la mezcla asfáltica evaluada. El índice de rigidez de tracción se calcula de acuerdo con la ecuación (1).

$$I_{RT} = \frac{1/2 \cdot F_{max}}{\Delta_m} \quad (1)$$

Donde,

I_{RT} : índice de rigidez a la tracción [kN/mm].

F_{max} : carga máxima registrada [kN].

Δ_m : desplazamiento antes a la carga máxima a $1/2 F_{max}$ [mm].

Índice de tenacidad (I_T) [(J/m²)·mm]: se define como la energía disipada en el proceso de ablandamiento multiplicada por un factor de fragilidad, el cual corresponde al desplazamiento realizado desde la carga máxima F_{max} hasta que la carga ha caído a la mitad de su valor máximo. Este índice tiene la finalidad de evaluar la tenacidad de la mezcla asfáltica, considerándose esta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ha alcanzado su resistencia máxima. Por tanto, a medida que este parámetro aumenta, la mezcla es más tenaz, y por otra parte, a medida que este factor disminuye, la mezcla tiene un comportamiento más frágil. Su expresión de cálculo se observa en la ecuación (2).

$$I_T = \frac{W_D - W_{F_{max}}}{h \cdot l} \cdot (\Delta_{mdp} - \Delta_{F_{max}}) \quad (2)$$

Donde,

I_T : índice de tenacidad [(J/m²)·mm].

investigación

W_D : trabajo realizado en el proceso de fisuración, área bajo la curva carga-desplazamiento [kN-mm].

WF_{max} : trabajo realizado hasta la carga máxima [kN-mm].

ΔF_{max} : desplazamiento a F_{max} [mm].

Δ_{mdp} : desplazamiento a $\frac{1}{2} F_{max}$ postpico [mm].

h : espesor de la probeta [m].

l : ancho de la probeta [m].

Con base en las investigaciones desarrolladas con el ensayo SCB a una velocidad de 1mm/min y a una temperatura de 15 °C, y en cuanto a lo económico, rápido, repetible, eficaz y eficiente del ensayo, sumado a los parámetros que se pueden obtener de la curva carga-desplazamiento establecidos en el ensayo Fénix y la posible correlación de estos con los ensayos de MD, RTI, fatiga, ahuellamiento, entre otros, se inició esta investigación con el objeto de establecer la viabilidad de su uso en mezclas asfálticas cerradas con granulometrías colombianas de Invias y del IDU. Esto con la finalidad de evidenciar su comportamiento mecánico y dinámico, pero de una forma más sencilla, eficaz, veloz y económica.

METODOLOGÍA

La metodología usada en la investigación aparece en la figura 6 y comienza con la caracterización de los materiales (asfalto, agregados, pavimento reciclado (RAP), asfaltita y cal). Posteriormente, se fabricaron las muestras de las mezclas asfálticas con diferentes granulometrías del IDU, md-10, md-12 y md-20 (IDU, 2011) y del Invias, mdc-2 (Invias, 2007). Estas fueron compactadas en diferentes niveles de energía, con diferentes materiales (asfaltita, RAP, modificado y convencional) y con reemplazos de relleno mineral por cal. Las probetas fabricadas se procedió a cortar-

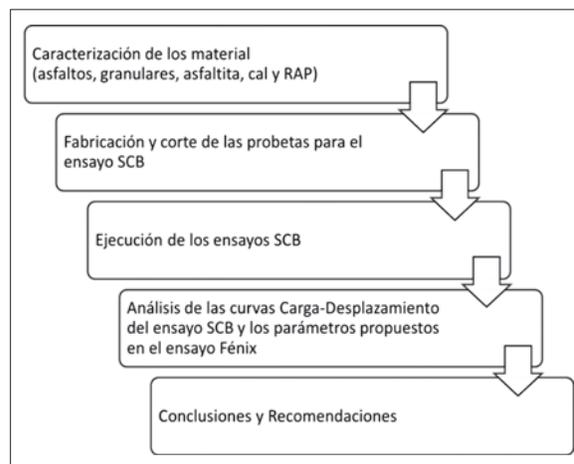


Figura 6. Diagrama de la metodología usada en la investigación

Fuente: elaboración propia.

las y acondicionarlas para hacer el ensayo SCB. A continuación se ejecutaron los ensayos a una velocidad de carga de 1mm/min y a una temperatura de 15 °C. Finalmente, se establecieron las curvas de carga-desplazamiento y los parámetros (F_{max} , ΔF_{max} , WF_{max} , Ws , IRT e IT), con el objeto de determinar el comportamiento mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas estudiadas y establecer la viabilidad del uso del ensayo SCB para caracterizar las mezclas asfálticas colombianas.

Caracterización de los materiales

Para la fabricación de las probetas de mezclas asfálticas del estudio se usaron granulares provenientes de la cantera del río Tunjuelito (tabla 1) (Londoño, 2012), asfaltitas de las minas de Boyacá (tabla 2) (Castillay Martínez, 2011), asfaltos de diferente penetración (tabla 3) (Ostos *et al.*, 2011) reemplazos de *filler* por cal (tabla 4) y RAP (tabla 5).

Fabricación de las probetas

Para el desarrollo de la investigación se fabricaron probetas cilíndricas de mezclas asfálticas

Tabla 1. Características de los agregados utilizados

Ensayo	Norma	Resultado Tunjuelito
Equivalente de arena [%]	INV. E-133	57,00
Resistencia al desgaste [%]	INV. E-218	29,90
Peso específico aparente agregado fino [%]	INV. E-222	2,60
Absorción agregado fino [%]	INV. E-222	1,10
Peso específico aparente agregado grueso [%]	INV. E-223	2,59
Absorción agregado grueso [%]	INV. E-133	1,60

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Características de las asfaltas de las minas de Boyacá

Muestra	Peso inicial (g)	Peso centrifugado (g)	Diferencia (g)	% Asfalto	Promedio (%)
1	1500,17	1392,38	107,79	7,74	7,50
2	1500,34	1396,00	104,34	7,47	
3	1500,09	1399,96	100,13	7,15	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Características de los asfaltos

Ensayo	Norma	Asfalto (60/70)	Asfalto (80/100)
Penetración (1/10 mm)	INV. E-706	63	89
Ductilidad (cm)	INV. E-702	120	133
Viscosidad (poise)	INV. E-716	1500	1250
Punto de ablandamiento (°C)	INV. E-712	47°C	52°C
Punto de llama e ignición (°C)	INV. E-709	235°C y 245°C	220°C y 225°C

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Características de la cal

Ensayo	Norma	Resultado
Densidad	INV. E-225	2980 kg/m ³

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Contenido de asfalto del pavimento reciclado

Peso	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
Inicial (g)	1200,03	1201,01	1200,13	1202,23	1200,52
Final (g)	1126,86	1127,32	1125,98	1129,20	1123,80
% Asfalto	6,10	6,14	6,18	6,07	6,39
Promedio	6,18 %				

Fuente: elaboración propia.

cerradas con granulometrías del IDU (md-10, md-12, md-20) y del Invias (mdc-2), utilizando asfaltos de penetración 60/70 y 80/100, agregados vírgenes y de recuperación (RAP), reemplazos de *filler* mineral por cal en diferentes porcentajes (100 %, 75 % y 50 %), y probetas compactadas a diferentes niveles de energía en el compactador giratorio (50, 100, 200 y 300 giros), y con diferentes tiempos de vibro-compactación (70, 90 y 120 s). Posteriormente, las probetas fabricadas se acondicionaron para el ensayo SCB, se cortaron en dos partes iguales y se entallaron. Por último, se coloca la muestra centrada y simplemente apoyada en el dispositivo para el ensayo y se aplica una carga constante en el centro de la luz de la muestra hasta llegar a la falla, a una velocidad de 1 mm/min y a una temperatura de 15 °C.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de la ejecución de los ensayos SCB para las diferentes mezclas asfálticas fabricadas con diferentes características, y de haber establecido los parámetros de las curvas carga-desplazamiento, se obtuvieron los siguientes resultados en la investigación:

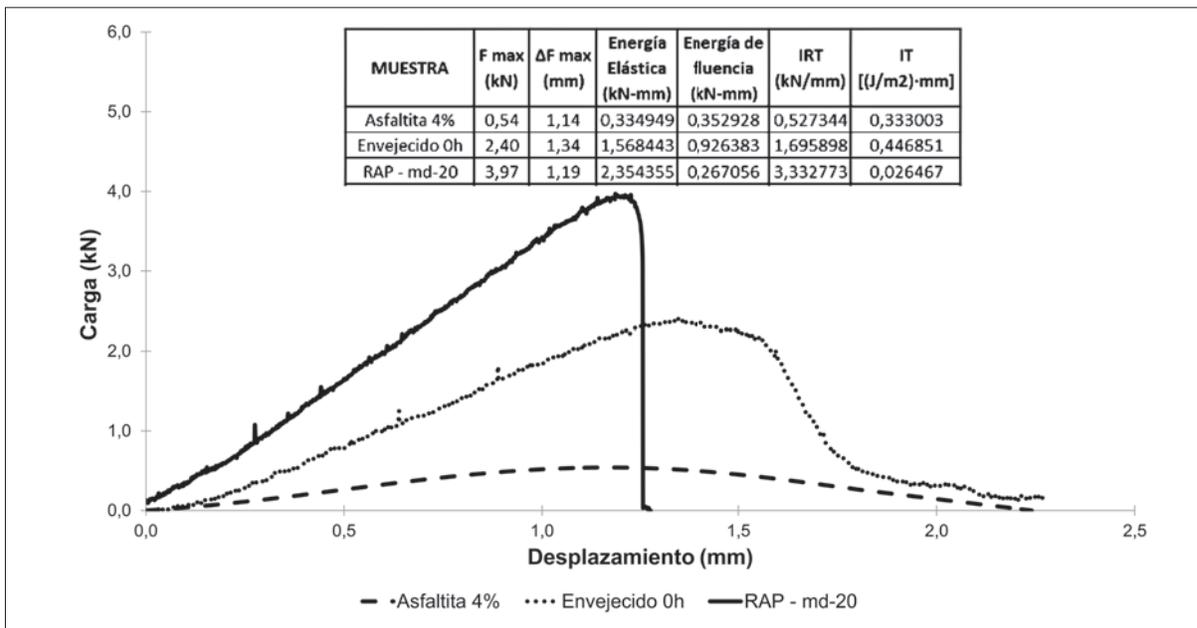


Figura 7. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB con RAP, asfaltita y asfalto 60/70

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se observan los resultados del ensayo SCB para tres mezclas asfálticas fabricadas con tres diferentes materiales: RAP, asfaltita y asfalto 60/70. En el análisis de las curvas de carga-desplazamiento se evidencia claramente el comportamiento de fragilidad de la mezcla con RAP, la cual consiste en soportar cargas elevadas, pero desplazamientos pequeños. Adicionalmente, se aprecia que al alcanzar su resistencia máxima falla en forma súbita, comportamiento característico de materiales rígidos o frágiles. Por otra parte, la curva de la mezcla asfáltica fabricada con asfaltita presenta un comportamiento totalmente contrario (dúctil), el cual muestra poca carga pero niveles de deformación altos. Para el caso de la mezcla fabricada con asfalto convencional (60/70) se observa una curva con resistencias y desplazamientos intermedios. Estos resultados permiten distinguir claramente el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas entre estados frágiles y dúctiles, dando la posibilidad de utilizar el ensayo como una herramienta de caracterización de mezclas asfálticas.

En la figura 8 se aprecian las curvas de carga-desplazamiento de tres mezclas asfálticas fabricadas con RAP al 100%, pero con granulometrías diferentes del IDU (md-10, md-12 y md-20). El comportamiento de las mezclas es similar, alcanzando altas resistencias y desplazamientos pequeños, lo cual indica que son extremadamente rígidas. Al comparar las curvas, el ensayo SCB diferencia la resistencia en función de la granulometría, siendo más resistente la granulometría md-20 y la menos resistente la md-10. Adicionalmente, el ensayo muestra el comportamiento frágil de estos materiales que consiste en tener cargas elevadas, deformaciones pequeñas y fallas súbitas.

Otro tema estudiado en la investigación consistió en la fabricación de mezclas asfálticas con asfaltita a las cuales se les adicionó asfalto 60/70 en diferentes porcentajes (0, 3 y 4%). En la figura 9 se observan los resultados de las curvas carga-desplazamiento, donde se evidencia que dadas las características de los materiales, su comportamiento es totalmente dúctil. Por otra parte, la sensibilidad del ensayo permite establecer dife-

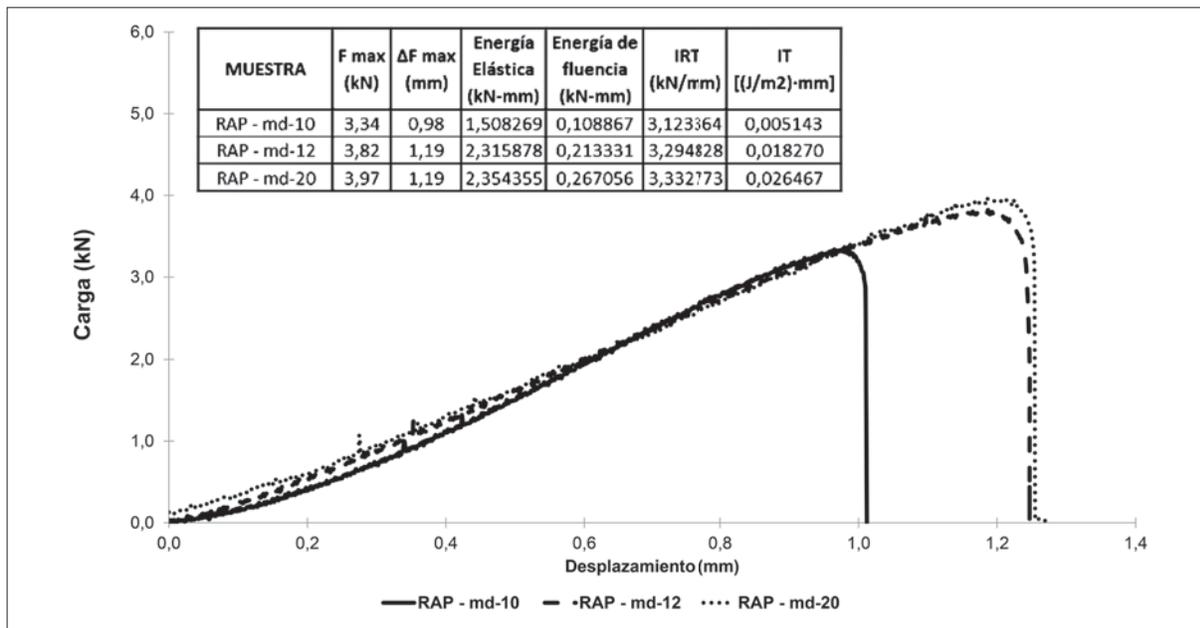


Figura 8. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB con RAP y diferentes granulometrías

Fuente: elaboración propia.

rencias de resistencia, desplazamiento, energías liberadas, índices de tenacidad e índices de rigidez a la tracción, al variar levemente el porcentaje de adición de asfalto. De los parámetros evaluados, se aprecia que la resistencia máxima se presenta en la mezcla con 4% de adición de asfalto, y la mínima en la mezcla con 0% de adición de asfalto. A medida que varían los porcentajes de asfalto se hacen presentes cambios elevados en la resistencia; esto indica que el ensayo es muy sensible a este tipo de variaciones, haciéndolo útil en la caracterización de mezclas asfálticas dúctiles.

En la figura 10 se pudo establecer que por las curvas carga-desplazamiento de mezclas asfálticas fabricadas con granulometría md-10 del IDU y asfalto 60/70, pero con diferentes reemplazos de *filler* mineral por cal (100%, 75%, 50%), se obtienen valores de resistencia directamente proporcionales al contenido de cal; esto evidencia el cambio de los parámetros del ensayo SCB en función del porcentaje de cal. En el caso del 100%, la resistencia fue de 3,24 kN y el desplazamiento fue de

1,11 mm, mientras que en las probetas con 75% de cal, la resistencia disminuyó a un valor de 2,90 kN y el desplazamiento se incrementó a 1,35 mm. Para la mezcla con 50% de cal, el valor de la carga máxima cayó a 2,60 kN y a un desplazamiento de 1,1 mm. Estos resultados muestran la bondad del ensayo al percibir cambios en las propiedades de una mezcla asfáltica al reemplazar el *filler* mineral por cal, lo cual pone de manifiesto su posible uso en la caracterización de estas mezclas asfálticas.

En la figura 11 se aprecian los resultados de las curvas carga-desplazamiento de muestras fabricadas con granulometría mdc-2 del Invias, las cuales fueron envejecidas a diferentes tiempos (0, 24 y 48 h) en horno con circulación de aire a 80 °C. Los resultados muestran que a mayor tiempo de envejecimiento la muestra se rigidiza, por lo tanto, alcanza mayores cargas y reduce su desplazamiento a carga máxima. Así mismo, se observa que en la medida que aumenta el periodo de envejecimiento, la muestra presenta una curva característica de materiales frágiles, cargas elevadas y ruptura súbita.

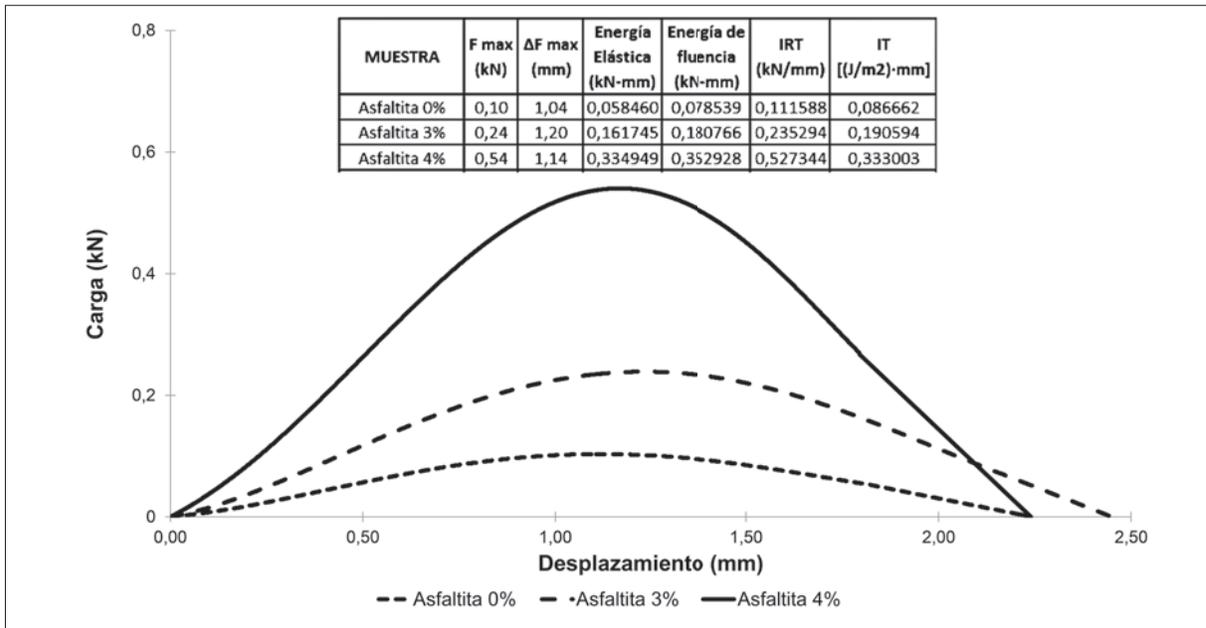


Figura 9. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltita con adición de asfalto en diferentes porcentajes (0, 3, 4 %)

Fuente: elaboración propia.

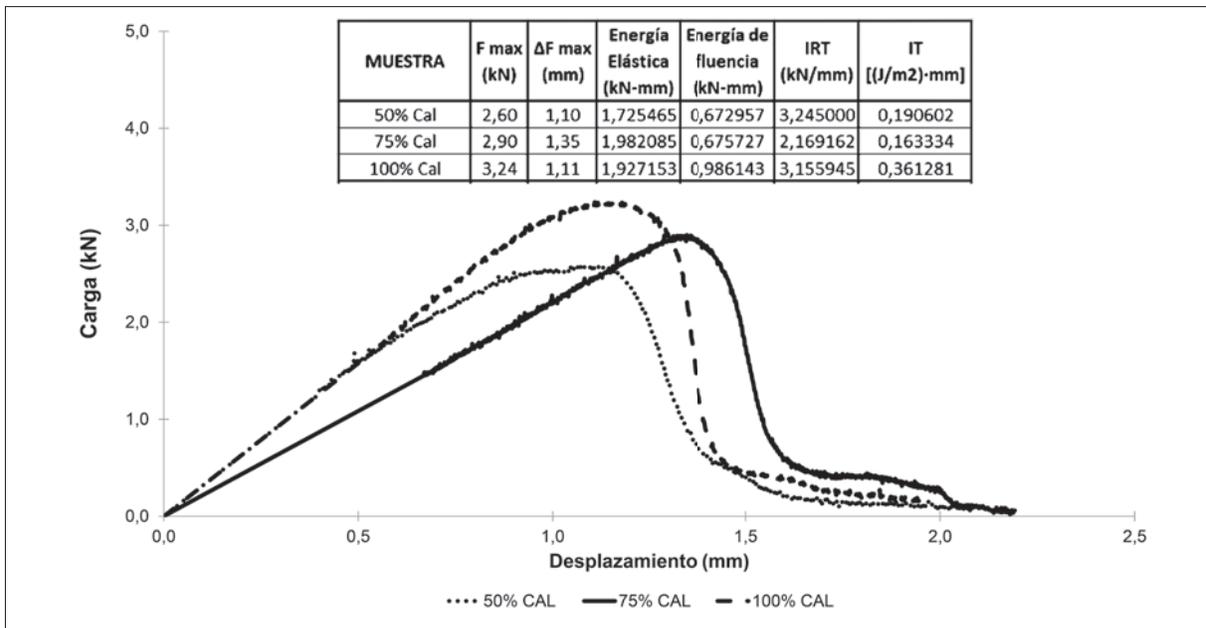


Figura 10. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes porcentajes de reemplazo de filler por cal (50, 75 y 100 %)

Fuente: elaboración propia.

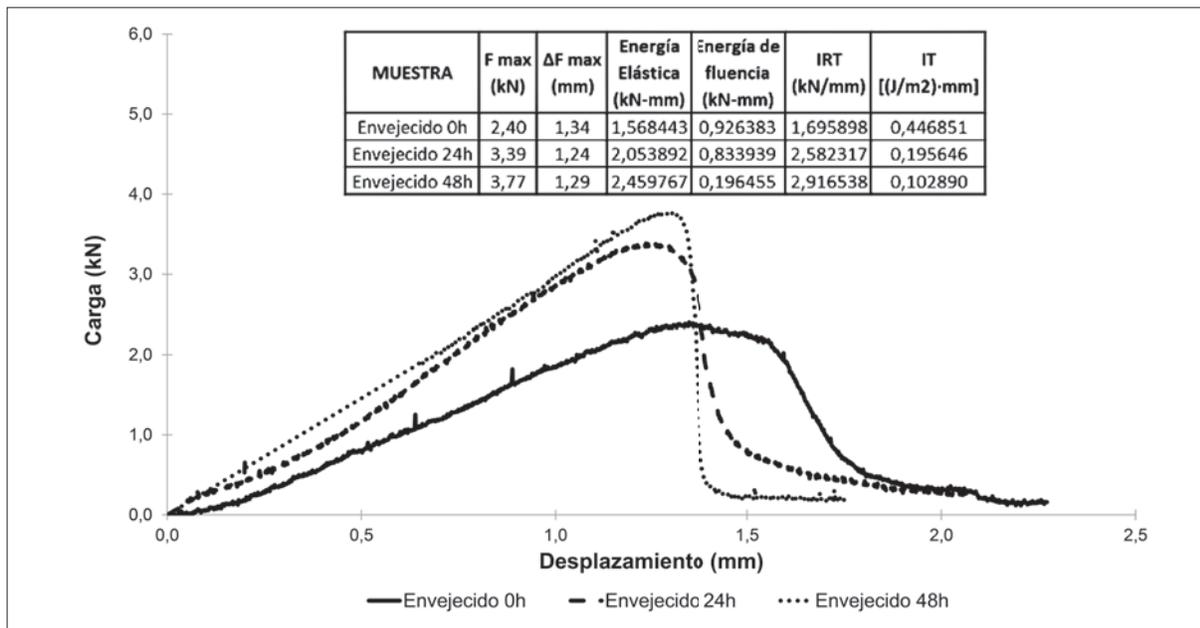


Figura 11. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes periodos de envejecimiento (0, 24 y 48h)

Fuente: elaboración propia.

Estos resultados ponen de manifiesto que el ensayo puede evidenciar cambios de comportamiento en función del envejecimiento de las mezclas.

En la figura 12 se presentan los resultados de las curvas carga-desplazamiento de muestras fabricadas con asfalto 80/100 y granulometría md-10 del IDU, compactadas con diferentes niveles de vibrocompactación (75, 90 y 120 s). Del análisis de los resultados se puede observar la pérdida de elasticidad de las mezclas, rigidizándose como efecto directo de la densificación sufrida por el incremento del tiempo de vibrocompactación, siendo así la mezcla con menor desplazamiento la compactada durante mayor tiempo (120 s), y la de mayor desplazamiento la compactada durante menor tiempo (75 s). Se aprecia que la resistencia obtenida de las muestras no presentó cambios significativos; sin embargo, el ensayo muestra cambios en sus niveles de desplazamiento a carga máxima, lo que evidencia cambios en las propiedades de mezclas asfálticas a partir del tiempo de vibrocompactación.

Por otra parte, en la figura 13 se muestran las curvas carga-desplazamiento de muestras con el mismo asfalto y granulometría, pero fabricadas con diferentes niveles de compactación en la prensa giratoria (50, 100, 200 y 300 giros). De las curvas se observa el aumento de la carga máxima en función de la cantidad de giros de compactación, siendo así la mezcla con mayor carga máxima la compactada a mayor cantidad de giros (300 giros) y la de menor carga máxima la compactada a menor cantidad de giros (50 giros). De los resultados encontrados en las probetas compactadas por diferentes medios, los cambios sufridos se evidencian por medio del ensayo SCB, nuevamente mostrando las bondades del ensayo a la hora de caracterizar las mezclas asfálticas estudiadas.

Del estudio y el análisis de los parámetros establecidos en el ensayo Fénix y obtenidas de las diferentes mezclas asfálticas estudiadas, se puede observar en la figura 14 la energía liberada (elástica y de fluencia) durante el proceso de fisuración. Del análisis de los valores de energía (elástica y

de fluencia), se observa que las muestras con RAP irrelevantemente su granulometría, presentan valores máximos de energía elástica y mínimos de energía de fluencia, comportamiento característico de mezclas asfálticas rígidas. Así mismo, las muestras fabricadas con asfaltitas, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4%), presentan un comportamiento totalmente contrario: energías elásticas y de fluencia muy bajas, característica de mezclas asfálticas dúctiles y de baja resistencia. Por otra parte, las mezclas asfálticas fabricadas con diferentes reemplazos de *filler* por cal (50, 75 y 100%) muestran que en la medida que aumenta el porcentaje de reemplazo, aumenta la energía elástica y de fluencia, mostrando que la cal rigidiza la mezcla, pero también aumenta su carga máxima. En el caso de las muestras compactadas a diferentes cantidad de giros (50, 100, 200 y 300 giros), se muestra que a mayor cantidad de giros se obtiene mayor energía (elástica y fluencia). Así mismo, en el proceso de vibro-compactación (75, 90 y 120 s) se observa que las energías (elástica y de fluencia) son relativamente homogéneas para los diferentes tiempos

de vibro-compactación. Finalmente, en las muestras envejecidas se observa que la energía elástica aumenta con el periodo de envejecimiento, comportamiento coherente por el proceso de rigidización que sufren las mezclas asfálticas.

En la figura 15 se tienen los resultados del IRT de las muestras fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación; este índice muestra qué tan flexible o rígida es una mezcla asfáltica: A mayor IRT la mezcla tiende a ser más rígida.

De los resultados se evidencia que las mezclas más rígidas son las fabricadas con RAP irrelevantemente de su granulometría, seguidas por las fabricadas con reemplazo de *filler* mineral por cal en diferentes proporciones (50, 75 y 100%). Para las muestras fabricadas con asfaltita, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4%), se obtuvieron los menores valores, lo cual era lo esperado, puesto que por la naturaleza de las muestras se afirma que tienen un comportamiento netamente dúctil, resistiendo poca carga y logrando grandes desplazamientos.

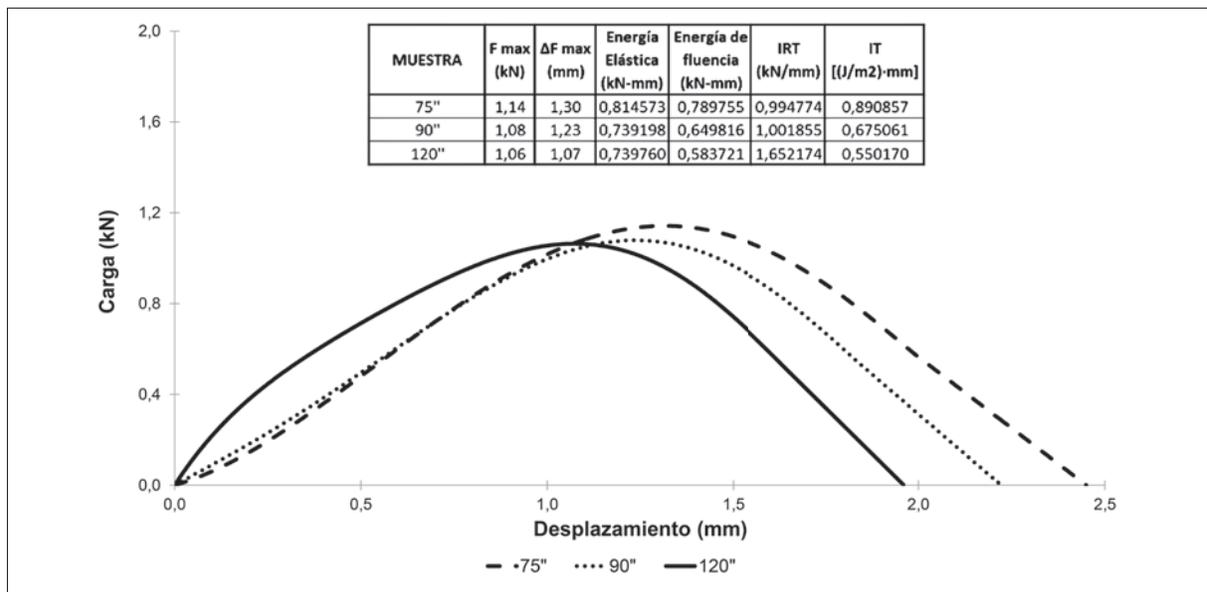


Figura 12. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes niveles de compactación (75, 90 y 120s)

Fuente: elaboración propia.

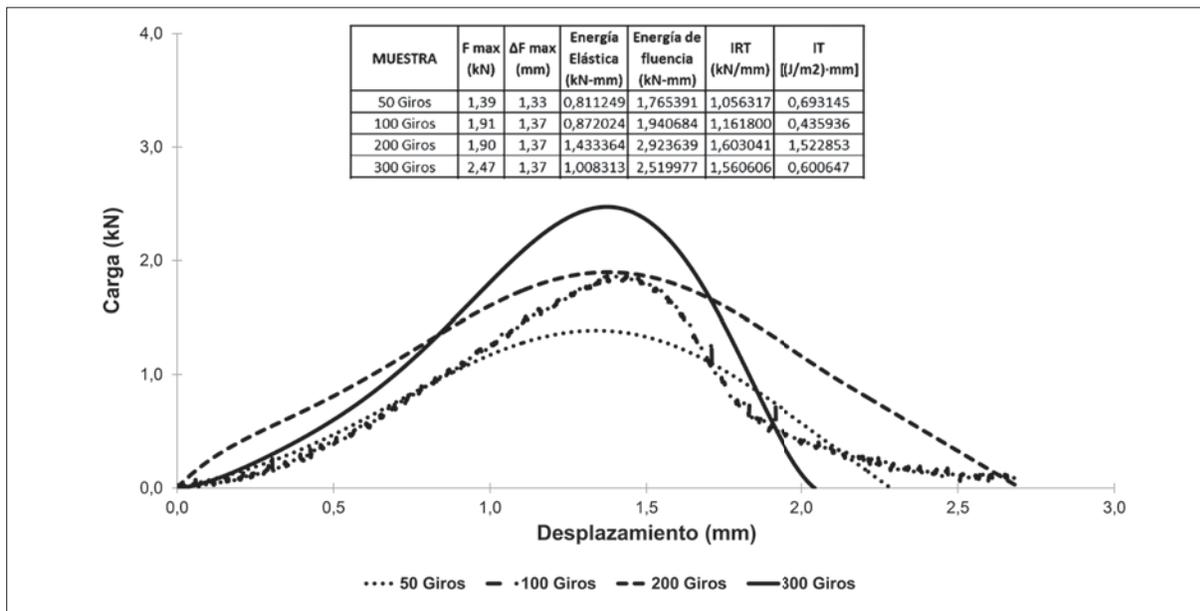


Figura 13. Curvas carga-desplazamiento ensayo SCB de asfaltos con diferentes niveles de compactación (50, 100, 200, 300 giros)

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de las muestras fabricadas con diferentes periodos de envejecimiento (0, 24 y 48 h), el IRT aumenta directamente con el periodo de envejecimiento, lo cual está relacionado con su proceso de rigidización. Así mismo, en las muestras fabricadas en diferentes niveles de compactación (50, 100, 200 y 300 giros), el IRT aumenta directamente con la cantidad de giros. Por otro lado, en las muestras fabricadas a diferentes tiempos de vibrocompactación (75, 90 y 120 s), se evidencia que para tiempos cortos (75 y 90 s), la densificación y la rigidización del material no es notoria, mientras que para mayores tiempos (120 s) la muestra gana rigidez, evidentemente en un incremento del IRT.

Finalmente, se calculó el IT de las muestras fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación, como se aprecia en la figura 16. Este índice mide la tenacidad de la mezcla asfáltica, considerándose esta como la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez que ha alcanzado su resistencia máxima. Para el caso de las mezclas asfálticas fabricadas con RAP, se apre-

cian los menores valores de este índice al ser este muy rígido y fallar de forma súbita. Para las muestras fabricadas con asfaltita, con y sin adición de asfalto (0, 3 y 4 %), se observa que este índice tiende a aumentar a mayor porcentaje de asfalto adicionado, hecho que se debe a la capacidad de mantener unidos sus componentes al aumentarlos porcentajes de asfalto. En las mezclas fabricadas con reemplazo de *filler* mineral por cal en diferentes proporciones (50, 75 y 100 %), este índice aumenta a mayor contenido de cal: esto indica que el comportamiento de las muestras tiende a ser tenaz como efecto de la rigidización del material. Por otro lado, para las muestras envejecidas a diferentes tiempos (0, 24 y 48 h), este índice tiende a disminuir a medida que aumenta el tiempo de envejecimiento, presentándose en las muestras un comportamiento frágil a tiempos mayores. Así mismo, para las muestras fabricadas a diferentes tiempos de vibrocompactación (75, 90 y 120 s), se puede afirmar que el índice disminuye a medida que aumenta el tiempo de vibrocompactación, evidenciándose nuevamente un comportamiento frágil. Por último, se puede manifestar que

el ensayo SCB y los parámetros calculados de las curvas carga-desplazamiento evidencian el comportamiento de mezclas asfálticas fabricadas con diferentes materiales y procesos de compactación; adicionalmente, es capaz de distinguir cambios en su rigidez, ductilidad, envejecimiento y reemplazo de materiales.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos de los diferentes ensayos SCB realizados a 15 °C, a una velocidad de aplicación de carga de 1mm/min y la definición de los parámetros de carga máxima, desplazamiento a carga máxima, desplazamiento al 50 % F_{max} prepico, desplazamiento al 50 % F_{max} postpico, energía elástica, energía de fluencia, índice de rigidez a la tracción e índice de energía de los diferentes materiales (Asfaltita, RAP, asfalto convencional), reemplazo de *filler* por cal en diferentes porcentajes y con diferentes niveles de compactación, se pudo concluir:

El ensayo SCB es sencillo, rápido, veloz y eficaz; puede establecer el comportamiento de mezclas

asfálticas con diferentes materiales y procesos de compactación, ahorrando recursos económicos y de capital.

La sensibilidad del ensayo permite distinguir comportamientos de materiales desde frágiles a dúctiles, compactados a niveles de energía, altos o bajos, envejecidos o sin envejecer y con diferentes reemplazos de *filler* por cal.

Los parámetros del ensayo Fénix (carga máxima, desplazamiento a carga máxima, energía liberada durante el proceso de fisuración, índice de rigidez a tracción e índice de tenacidad), fueron posibles de calcular con las curvas carga-desplazamiento obtenidas en el ensayo SCB, y estos permiten definir las características y propiedades de las mezclas asfálticas estudiadas.

Finalmente, el ensayo SCB puede ser correlacionado con los ensayos de módulo dinámico, resistencia a la tracción indirecta, fatiga y ahuecamiento, entre otros, alcances que no están incluidos en esta investigación, pero serían de gran aporte al comportamiento de las mezclas asfálticas estudiadas.

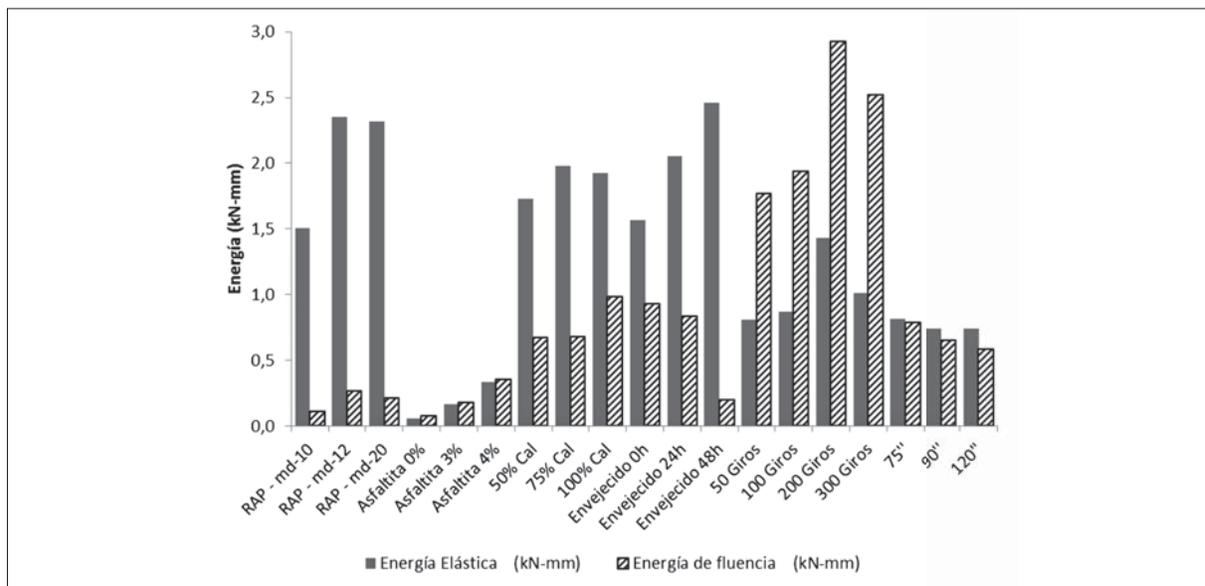


Figura 14. Energía elástica y de fluencia de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

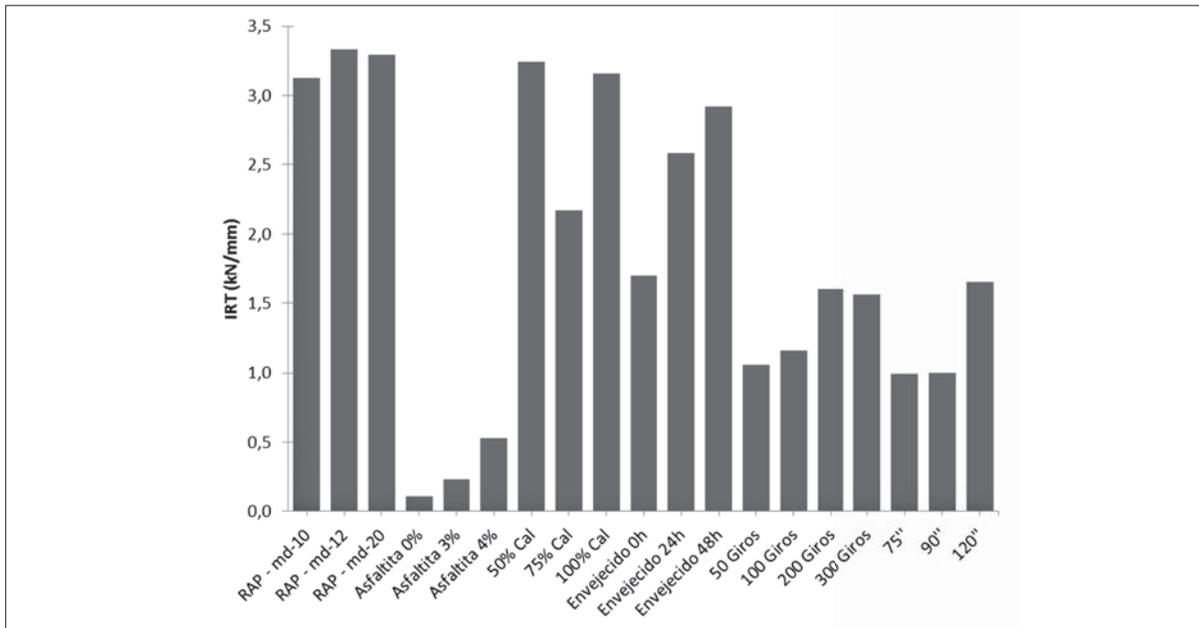


Figura 15. Índice de rigidez a la tracción de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

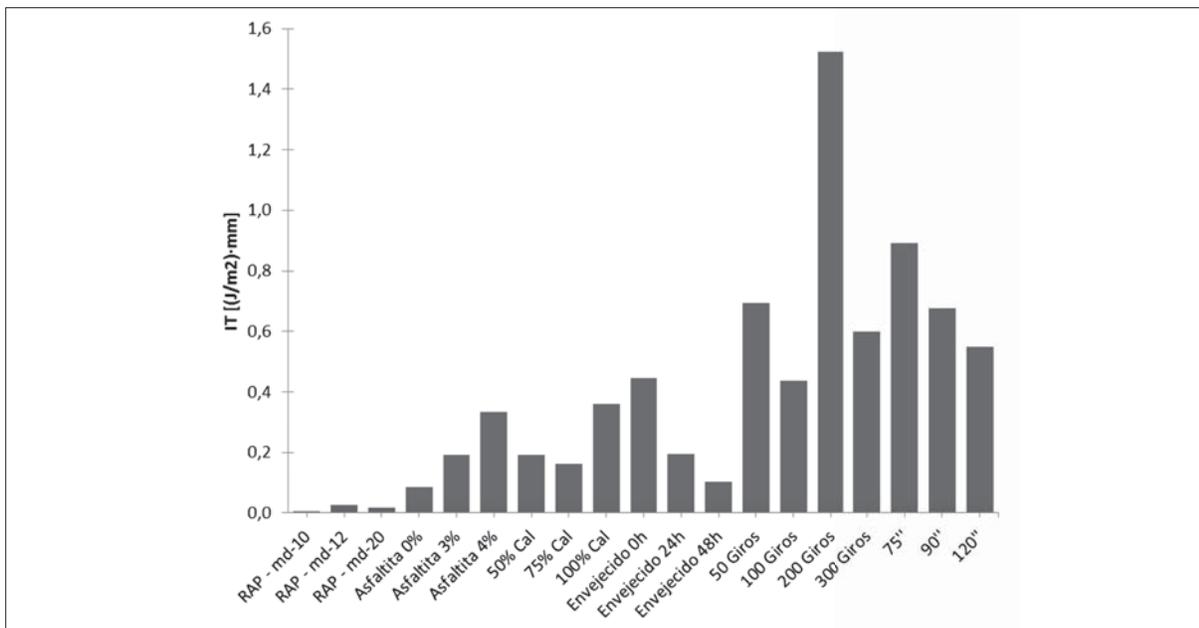


Figura 16. Índice de tenacidad de diferentes mezclas asfálticas

Fuente: elaboración propia.

REFERENCIAS

- AENOR-Asociación Española de Normalización y Certificación. (2007). *Normativa UNE-EN, Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carreteras*. Madrid: AENOR.
- Arabandi, M. y Ferdowsi, B. (2009). Evaluating the Semi-Circular Bending test for HMA Mixtures. *Journal IJE Transactions A: Basics*, 22(1), pp. 47-58.
- Castillo, J. y Martínez, C. (2011). *Factibilidad del empleo de asfaltita proveniente del departamento de Boyacá en la fabricación de mezclas asfálticas*. Proyecto de grado, Univ. Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- IDU-Instituto de Desarrollo Urbano. (2011). *Especificaciones generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público de Bogotá*, Bogotá D.C., Colombia, (IDU).
- Invias- Instituto Nacional de Vías. (2007). *Especificaciones generales de construcción para carreteras*. Bogotá D.C., Colombia: Ed. Escuela colombiana de Ingeniería, (Invias).
- Lim, I., Jonston, W. y Choi, S. (1993). Stress Intensity Factors for Semi-Circular Specimens under Three-Point Bending. *Journal Engineering Fracture Mechanics*, 44(3), 363-382.
- Liu, X. y Marasteanu, M. (2010). Using Semi Circular Bending Test to Evaluate Low Temperature Fracture Resistance for Asphalt Concrete. *Journal Society for Experimental Mechanics, Minneapolis*, 50(7), 867-876.
- Londoño, A. (2012). *Incidencia de los agregados de la granulometría y del tipo de asfalto en las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas asfálticas*. Proyecto de grado, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X. y Erkens, S. (2002). Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful? *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 71, 795-815.
- Molenaar, J., Liu, X. y Molenaar, A. (2003). *Resistance to crack-growth and fracture of asphalt mixture*, Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials, Zurich, pp. 618-625.
- Ostos, L., Duarte, J. y Reyes-Ortiz, O. (2011). Comportamiento de mezclas asfálticas de Instituto de Desarrollo Urbano con adición de pavimento reciclado. (RAP). *SCIVI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento Vial*, Bogotá D.C. Colombia.
- Papagiannakis, A. y Masad, E. (2008). *Pavement Design and Materials*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Pérez, F., Cepeda, J. y Miró, R. (2001). *Análisis del Comportamiento a Fatiga de las Mezclas Bituminosas. Relación entre Tenacidad y Resistencia a la Fatiga*. Laboratorio de Caminos, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Prapoorna, K., Said, S. and Hakim, H. (2012). Asphalt Mixtures' Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests. *International Journal of pavement research and technology, Jhongli*, 5(4), 209-217.

Valdés, G. (2011). *Evaluación del proceso de fisuración mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental: Ensayo Fénix*. Tesis Doctoral. Prog. ITT. Univ. Cataluña, Barcelona, Cataluña.

Valdés, G., Pérez, F. y Botella, R. (2009). Ensayo fénix, una nueva metodología para medir la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas. *Revista de la construcción*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 8(1), 114-125.