

ARTÍCULO CIENTÍFICO / RESEARCH ARTICLE

**Cambios dinámicos y mecánicos
de una mezcla asfáltica densa
por las propiedades del asfalto y la
energía de compactación**

Dynamics and mechanicals changes
of the asphalt mixture properties
by asphalt type and compaction energy

Oscar J. Reyes-Ortiz*

* Ing. Civil, MSc. Profesor asociado, Programa de Ingeniería Civil – Grupo Geotecnia, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá (Colombia). oscar.reyes@unimilitar.edu.co

Correspondencia: Carrera 11 N° 101-80, Bogotá (Colombia).

Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia de tres asfaltos con características diferentes (Penetración 60/70, Penetración 85/100 y asfalto modificado con polímero) en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica densa (Md-10), usada como capa de rodadura según especificaciones del IDU. El contenido óptimo de asfalto se determinó mediante el ensayo Marshall y la caracterización mecánica y dinámica de la mezcla se realizó con los ensayos de compresión diametral a 15°C, ensayo de pista en laboratorio a 900 MPa y 60°C, módulo resiliente a 15, 20 y 30°C y 5 Hz de frecuencia y la curva de estado de cohesión mediante el procedimiento de Caracterización Universal de Ligantes (UCL) a 0, 10, 20, 30 y 40°C. El estudio determinó que la mezcla construida con el asfalto 60/70 presenta mayor valor de módulo resiliente a las temperaturas estudiadas y que la mezcla fabricada con el asfalto modificado tiene deformaciones plásticas muy inferiores a los asfaltos convencionales. Por último, la resistencia a tracción indirecta y la curva de estado de cohesión es mejor para el asfalto modificado.

Palabras clave: Módulo resiliente, deformación plástica, mezcla asfáltica, granulometría y UCL.

Abstract

The objective of this study was to evaluate the influence of three types of asphalt with different characteristics (60/70 of Penetration, 85/100 of Penetration and polymer modified asphalt) and compaction energy in the mechanical and dynamic changes of the dense asphalt mixture, used as a rolling layer by specifications IDU. The ideal asphalt content was determined by the Marshall. The mechanics and dynamic characterization of the mixture, was realized with diametral compression tests at 15 ° C, rutting with 900 MPa and 60° C, resilient modulus with 15, 20 and 30 °C, 5 Hz frequency and the cohesion curve through the characterization Universal Binders (UCL) test with 0, 10, 20, 30 and 40° C. The study found that the results show that the mixture prepared with asphalt 60/70 presents higher resilient modulus value at temperatures studied and the mixture manufactured with modified asphalt has rutting lower than conventional asphalt. Finally, resistance to traction and indirect cohesion curve state is best for the modified asphalt

Keywords: Resilient modulus, rutting, asphalt mixture, aggregate gradations and UCL.

*Fecha de recepción: 29 de agosto de 2008
Fecha de aceptación: 17 de junio de 2009*

1. INTRODUCCIÓN

La carretera constituye una de las infraestructuras de uso diario cuya necesidad está más allá de toda duda, ya que es parte principal de la movilidad

de los seres humanos y las mercancías, de la economía de un país y del desarrollo e integración del mismo. La mayoría de las carreteras están construidas con mezclas en las que el asfalto es uno de sus principales componentes, razón por la cual se hace necesario el estudio de sus propiedades mecánicas y dinámicas como elemento individual y como parte de la mezcla asfáltica. A partir de las condiciones ambientales, el flujo vehicular, las cargas de los camiones, la temperatura, el material pétreo y la adherencia, entre otras variables, se selecciona el asfalto que se va a emplear en la mezcla para que tenga un comportamiento adecuado en la vía. Los asfaltos normalmente son caracterizados con ensayos clásicos como la penetración, la viscosidad, punto de ablandamiento, ductilidad, densidad, etc.; sin embargo, recientemente con la metodología Superpave se emplean ensayos cada vez más sofisticados, como los ensayos de módulo complejo, deformación, envejecimiento, fatiga, energía disipada, etc., todo ello con objeto de seleccionar el asfalto adecuado para obtener una mezcla asfáltica con mejor comportamiento [1].

Las mezclas asfálticas en función de la temperatura ambiental pueden tener un comportamiento elástico lineal, no lineal o viscoso. A bajas temperaturas, el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se va comportando como un material elástico no lineal, y aparece un comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando. Es así como en épocas de temperaturas bajas (invierno) no existen deformaciones plásticas, su resistencia aumenta y el comportamiento normalmente es elástico. A temperaturas intermedias y elevadas, la cohesión de la mezcla disminuye por el cambio de estado del asfalto, y crea deformaciones permanentes y reducción de sus propiedades mecánicas y dinámicas [2].

La vida útil de una estructura de pavimentos depende de muchas variables, como el clima, la calidad de los materiales, el tráfico (actual y proyectado), las cargas de los ejes, los procesos constructivos, el diseño de las capas, y especialmente la respuesta de los materiales ante estas variables. Una de las metodologías de diseño de pavimentos es la empírico-mecanístico o racional, que plantea la estructura del pavimento como un conjunto de capas horizontales homogéneas superpuestas, de las cuales se debe conocer el módulo de rigidez (E_i), la relación de poisson (ν_i) y su espesor (h_i). De otra parte, la carga de los vehículos transmitida a la estructura de pavimento es simulada como un círculo de radio a (área de la superficie de la impronta que deja el neumático) y una carga homogénea distribuida (figura 1) [3].

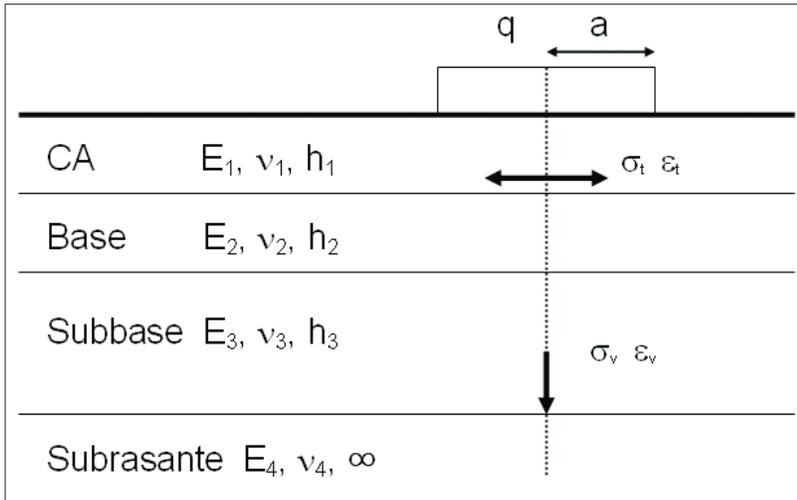


Figura 1. Diagrama del modelo de la estructura de pavimentos por metodología empírico-mecanicista

La respuesta del modelo descrito anteriormente son las deformaciones y esfuerzos horizontales y verticales ($s_{v,h}$ y $e_{v,h}$) de cada una de las capas, las cuales son comparadas con las determinadas en el laboratorio por diferentes ensayos. Los ensayos que se emplean para obtener el módulo de rigidez en el laboratorio son el módulo resiliente o el módulo dinámico a diferentes frecuencias y temperaturas, la resistencia mediante los ensayos de compresión diametral y tracción directa, y el fallo por fatiga mediante ensayos dinámicos de leyes de fatiga. Adicionalmente, se realiza el ensayo de pista en laboratorio de la capa de rodadura para ver el potencial de ahuellamiento [4, 5 y 6]. Por último, la Universidad Politécnica de Cataluña desarrolló el método de Caracterización Universal de Ligantes (UCL) para comparar la cohesión de los asfaltos con una granulometría específica y a diferentes temperaturas que reproducen las condiciones de servicio de la vía [7].

Estudios realizados por múltiples autores nacionales e internacionales han determinado que el tipo de asfalto, granulometría y energía de compactación empleados en la fabricación de una mezcla asfáltica afectan significativamente su comportamiento; por ejemplo, Baha Vural [8] determinó que el módulo de rigidez de una mezcla asfáltica utilizando diferentes asfaltos (AC-5, AC-10, AC-20 y modificado con SBS) tiene variaciones superiores al 50, en especial los asfaltos modificados. De otra parte, Ruiz y Pérez [3] estu-

diaron el comportamiento a la deformación plástica de diferentes mezclas asfálticas construidas con diferentes asfaltos, y encontraron grandes cambios en la velocidad de deformación permanente de la mezcla debido al tipo de asfalto; de igual manera, determinaron correlaciones entre la penetración, punto de ablandamiento y otras variables del asfalto con el ahuellamiento.

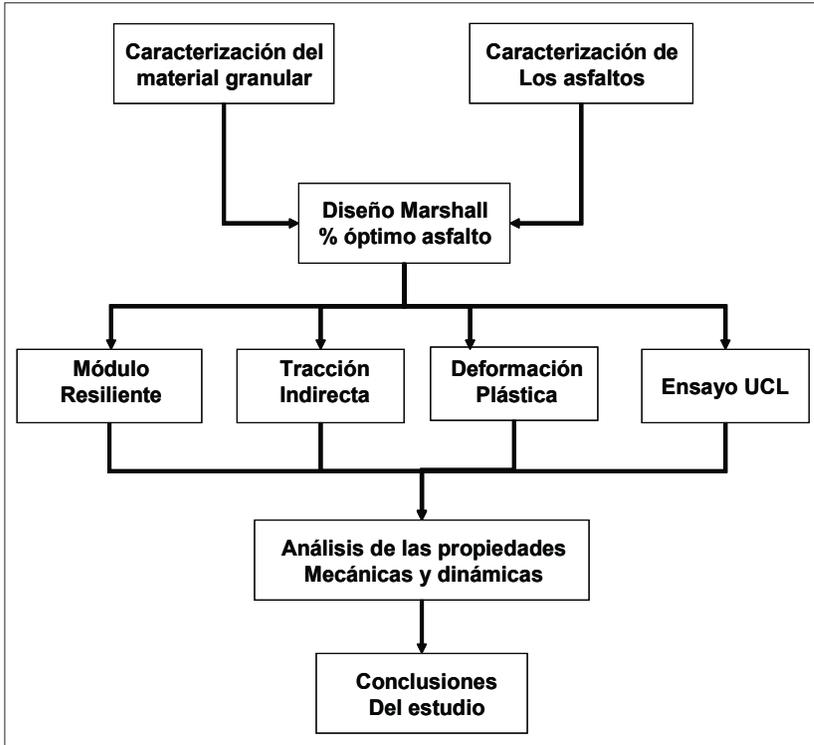


Figura 2. Diagrama de la metodología utilizada en la investigación

Kanitpong y Bahia [9] adelantaron un estudio con objeto de determinar una correlación entre la adhesión y cohesión de los asfaltos con la resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas construidas con los mismos y ensayados a 25°C. Encontraron que existe una relación directa: a mayor cohesión y adhesión, mayor es la resistencia a la tracción indirecta. Para determinar la cohesión y adherencia de los asfaltos emplearon el reómetro de corte dinámico.

Reyes-Ortiz y Camacho [10] estudiaron el efecto del huso granulométrico en el ahuellamiento de mezclas asfálticas del INVIAS e IDU, y encontraron

que para muestras compactadas con 50 golpes por cara, la velocidad de deformación sólo la cumple la granulometría MD10 del IDU en sus husos granulométricos y la MD20 en la curva inferior. Adicionalmente, observaron que para el nivel de energía de compactación de 75 golpes por cara, la mezcla asfáltica MD10 es nuevamente la única que cumple el requisito de velocidad de deformación en su franja granulométrica. Por último, la mezcla MDC-2 del INVIAS en su franja inferior cumple con el requerimiento de la norma en cuanto a velocidad de deformación.

Esta investigación tiene por objeto determinar la influencia del tipo de asfalto empleado en la fabricación de una mezcla asfáltica densa, con granulometría MD10 del IDU, en sus propiedades de deformación permanente, cohesión, módulo resiliente y resistencia a la tracción indirecta.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el desarrollo de esta investigación aparece en la figura 2. La investigación inició con la caracterización de los asfaltos y el material granular, seguido de la determinación del porcentaje óptimo de asfalto con la metodología Marshall para los diferentes asfaltos estudiados. Con estos valores se fabricaron muestras Marshall compactadas a 50 y 75 golpes por cara para ser ensayadas a módulo resiliente, tracción indirecta, deformación plástica y UCL. Por último, se analizaron los resultados y se determinó el efecto del tipo de asfalto y la energía de compactación en las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla asfáltica estudiada.

a. Caracterización del granular

El origen del material utilizado en la investigación procede del río Guayuriba, Km 14 de la vía Villavicencio-Acacias. El material granular se caracterizó por medio de los ensayos de laboratorio que se referencia en el cuadro 1 [4].

b. Caracterización del asfalto

El asfalto empleado en la investigación presenta las características que se relacionan en el cuadro 2 [4].

c. Curva granulométrica

La curva granulométrica utilizada en la investigación corresponde a la MD-10 del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU [11], centrada en su huso (figura 3).

Cuadro 1. Ensayos caracterización del material granular

ENSAYO	NORMA	RESULTADO
Equivalente de arena	INVE-133	72,93%
Resistencia al desgaste	INVE-218	15,79%
Peso específico aparente agregado fino	INVE-222	2,41 g/cm ³
Absorción agregado fino	INVE-222	3,71%
Peso específico aparente agregado grueso	INVE-223	2,625 g/cm ³
Absorción agregado grueso	INVE-133	0,47%

Cuadro 2. Ensayos caracterización de los asfaltos

ENSAYO	NORMA	Asfalto 60-70	Asfalto 85-100	Asfalto modificado
Viscosidad dinámica a 135°C [Pa.s]	-	0,56	0,40	2,37
Penetración	INVE-706	65	91	60
Punto de ablandamiento [°C]	INVE-712	52	49	68
Peso unitario del asfalto sólido [gr/cm ³]	INVE-707	1,01	1,01	0,91
Punto de ignición [°C]	INVE-709	238	240	243
Punto de llama [°C]	INVE-709	244	243	247
Pérdida de masa RTFOT (%)	ASTM D-1754	0,5	0,7	0,6
Módulo de Rigidez a 58°C y 1.59 Hz [kPa]	V. de Poel	11,8	4,02	65

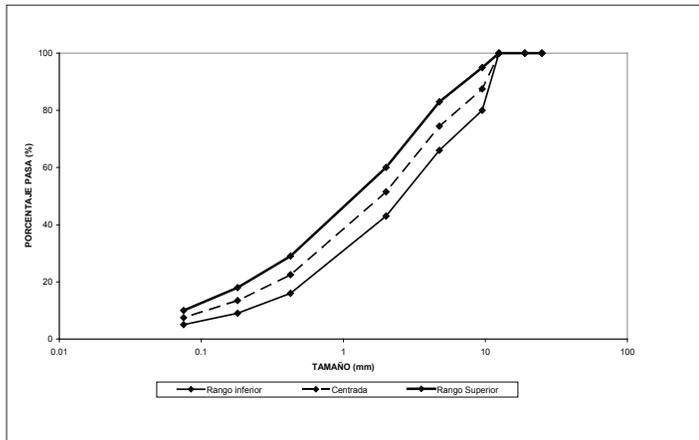


Figura 3. Curva granulométrica MD10 del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU)

d. Porcentaje óptimo de asfalto

El porcentaje óptimo de asfalto se determinó mediante el ensayo Marshall [4], con la fabricación de 10 probetas por cada tipo de asfalto (cinco probetas para una energía de compactación de 50 golpes y cinco para 75 golpes). El porcentaje de asfalto se varió entre el 5,0 y 7,0 %. En el cuadro 3 se relacionan los porcentajes óptimos de asfalto encontrados.

Cuadro 3. Porcentajes de asfalto óptimos de cada granulometría

Tipo de asfalto	% ÓPTIMO DE ASFALTO
60/70	6,0
85/100	6,25
Modificado (SBS)	6,0

e. Ensayos de tracción indirecta

Las muestras fabricadas para los ensayos de tracción indirecta fueron construidas mediante el compactador Marshall a 50 y 75 golpes y la temperatura de ensayo fue de 15°C, como se observa en la figura 4.



Figura 4. Ensayo de compresión diametral en mezclas asfálticas

f. Ensayos de módulo resiliente

Las probetas para los ensayos de módulo resiliente fueron fabricadas con el equipo Marshall a 50 y 75 golpes. Las muestras fueron ensayadas a temperaturas de 15, 20 y 30°C y a una frecuencia de 5 Hz, como se observa en la figura 5. El ensayo de módulo resiliente consiste en aplicar pulsos de cargas de amplitud y duración preestablecidos, seguidos de un tiempo de reposo. El pulso de carga debe estar entre el 10 y 50% de su resistencia a la tracción indirecta. El módulo resiliente total se calcula según la ecuación 1 [4]:

$$E_T = \frac{P^* (n + 0,27)}{SD_T}$$

Donde

E_T = Módulo Resiliente total [MPa]

P = amplitud pulso de carga [N]

n = Coeficiente de poisson

S = Espesor probeta [mm]

D_T = Deformación resiliente total [mm]



Figura 5. Ensayo de módulo resiliente en mezclas asfálticas

g. Ensayos de pista en laboratorio

Con la densidad y porcentaje de asfalto determinada para las probetas Marshall a 50 y 75 golpes se calculó el material necesario para fabricar muestras de ahuellamiento con la misma densidad y características. Las muestras fueron ensayadas a una presión vertical de 900 kPa, a una frecuencia de 42 ciclos por minuto y una temperatura de 60°C, como se observa en la figura 6 [4].

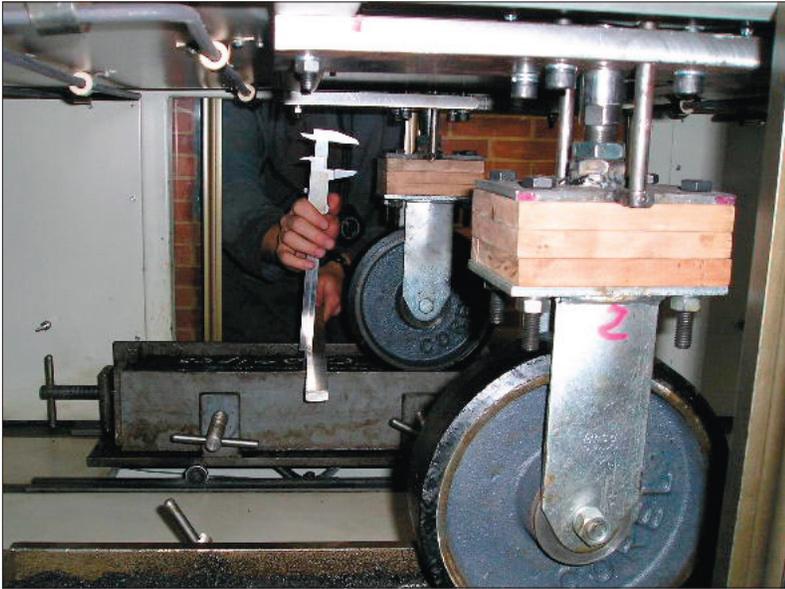


Figura 6. Ensayo de pista en laboratorio

h. Ensayos Cantabro (Procedimiento UCL)

Las muestras para seguir el procedimiento UCL fueron fabricadas según lo establecido por la Universidad Politécnica de Cataluña, consistente en compactar las muestras con el martillo Marshall a 50 golpes por cara y con una granulometría, como se observa en el cuadro 4. Las muestras fueron ensayadas a temperaturas de 0, 10, 20, 30 y 40°C, y el procedimiento del ensayo consiste en someter a 300 revoluciones las muestras a la abrasión en la Máquina de Los Ángeles sin las bolas de acero. Las probetas se pesan antes y después del ensayo, valores con los cuales se calcula la pérdida de material por abrasión, que los autores del procedimiento correlacionan con la cohesión del asfalto con el granular utilizado [7] (figura 7).



Figura 7. Ensayo universal de caracterización de ligantes. UCL

Cuadro 4. Granulometría muestras ensayos UCL

Tamiz UNE (mm)	% Pasa
5,0	100
2,5	20
0,63	0

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De los ensayos realizados para determinar la influencia del tipo de asfalto y la energía de compactación en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica, con granulometría MD-10 del IDU, se obtuvieron los siguientes resultados:

Ensayos de tracción indirecta

En la figura 8 se observa que el asfalto modificado presenta la mayor resistencia y alcanza un valor de 1567 Pa. Los asfaltos convencionales (60/70 y 85/100) tienen una resistencia máxima similar entre ellos e igual a 1150 Pa aproximadamente. Es importante resaltar que el desplazamiento que las muestras experimentan para obtener la resistencia máxima es superior para el asfalto modificado, seguido del asfalto 85/100, y por último el asfalto 60/70, tal como se observa en el cuadro 5. Estos valores evidencian que el asfalto modificado y el 85/100 son más dúctiles que el asfalto 60/70, y ponen de manifiesto que ante el fenómeno de fatiga su comportamiento sería más favorable.

Cuadro 5. Resistencia máxima a la tracción indirecta y su respectivo desplazamiento

Tipo asfalto	Resistencia Máxima [Pa]	Desplazamiento [mm]
60/70	1166	2,37
85/100	1135	3,09
Modificado (SBS)	1567	3,42

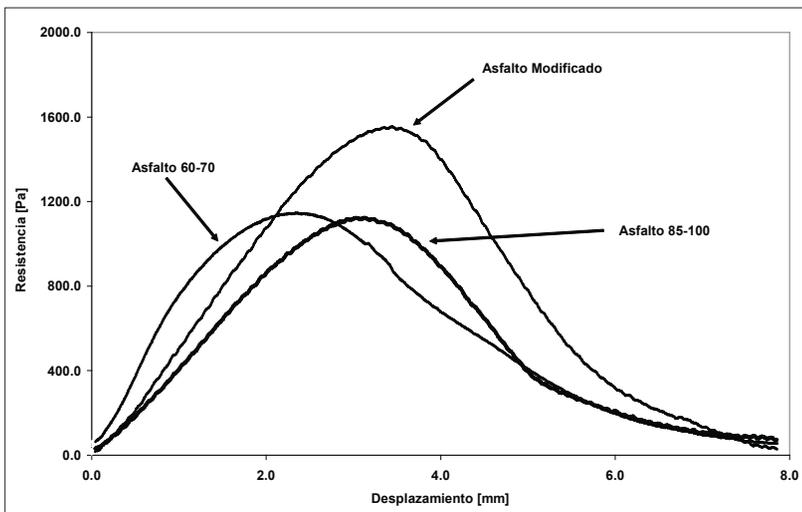


Figura 8. Resistencia a la tracción indirecta de las mezclas fabricadas con asfalto 60/70, 85/100 y modificado

• **Ensayos de pista en laboratorio**

En la figura 9 se aprecia el máximo ahuellamiento experimentado por las muestras (25 y 36 mm aproximadamente), correspondiente a las fabricadas con el asfalto 85/100. Las muestras construidas con el asfalto modificado presentan una deformación permanente muy baja (5.5 mm) y muy similar, sin importar la energía de compactación (50 y 75 golpes). Las muestras hechas con el asfalto 60/70 presentaron una deformación permanente de 18 mm para las compactadas con 75 golpes y de 25 mm para las compactadas con 50 golpes, y se ubican entre los ahuellamientos experimentados

por los otros asfaltos estudiados. Con base en la figura 10 y el cuadro 6, velocidad de deformación, se puede concluir que el asfalto modificado presenta la menor velocidad de deformación (0.28 mm/min), seguido del asfalto 60/70 con 5.32 mm/min y, por último, el asfalto 85/100 con 12.6 mm/min. Se resalta que la velocidad de deformación para los tres asfaltos estudiados, así como los dos niveles de energía de compactación, cumplen con el requisito establecido en la norma (20mm/min).

• **Ensayos de módulo resiliente**

En la figura 11, módulo resiliente contra temperatura del ensayo, se observa que sin importar la temperatura y el nivel de energía de compactación, la mezcla con asfalto 60/70 presenta los mayores valores de módulo, seguida de la mezcla con asfalto 85/100. Con respecto a los módulos obtenidos para la mezcla con el asfalto modificado, se observa que sus valores son aproximadamente la mitad de los obtenidos para la mezcla con asfalto 60/70. Como era de esperarse, en la medida que la temperatura disminuye, el módulo resiliente aumenta, sin importar el tipo de asfalto utilizado; de igual manera, a mayor nivel de energía de compactación mayor es el módulo. Es importante resaltar que las diferencias entre los módulos de las mezclas fabricadas con diferentes asfaltos es mayor entre menor es la temperatura del ensayo.

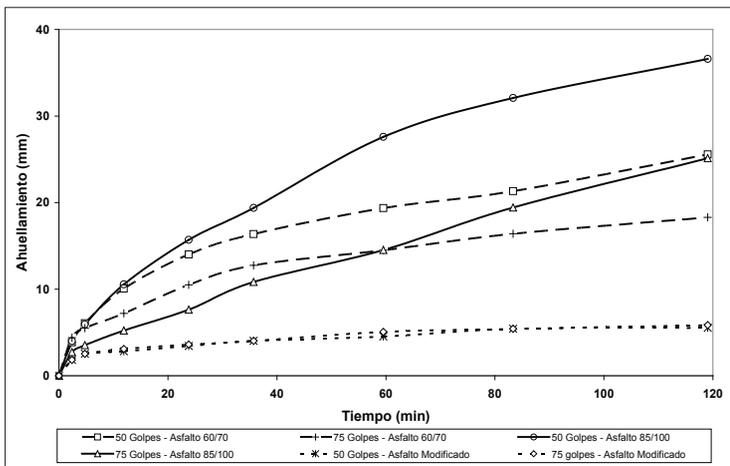


Figura 9. Ahuellamiento de las probetas fabricadas con asfalto 60/70, 85/100 y modificado

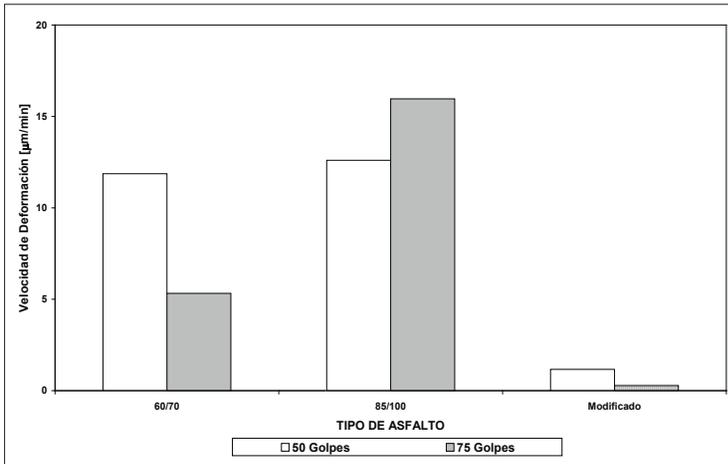


Figura 10. Velocidad de deformación de las muestras fabricadas con los asfaltos 60/70, 85/100 y modificado

Cuadro 6. Velocidad de deformación de las mezclas estudiadas

Tipo de asfalto	Energía compactación	Velocidad deformación [mm/min]
60/70	50	11,86
85/100	50	15,96
Modificado	50	1,17
60/70	75	5,32
85/100	75	12,96
Modificado	75	0,28

• **Ensayos Cantabro (Procedimiento UCL)**

En la figura 12 se puede observar que a partir del procedimiento UCL a diferentes temperaturas, el asfalto modificado presenta el menor desgaste, sin importar la temperatura del ensayo, es decir, una cohesión mayor (los autores del procedimiento manifiestan una correlación inversamente proporcional entre desgaste y cohesión, es decir, entre menor desgaste, la cohesión es mayor). Adicionalmente, se aprecia que el efecto de la temperatura en el desgaste es muy poco. Para el caso de los asfaltos 60/70 y 85/100, la cohe-

sión (desgaste) es menor a temperaturas bajas (0 y 10°C) y va aumentando en la medida que la temperatura crece, y se hace máxima a 40°C.

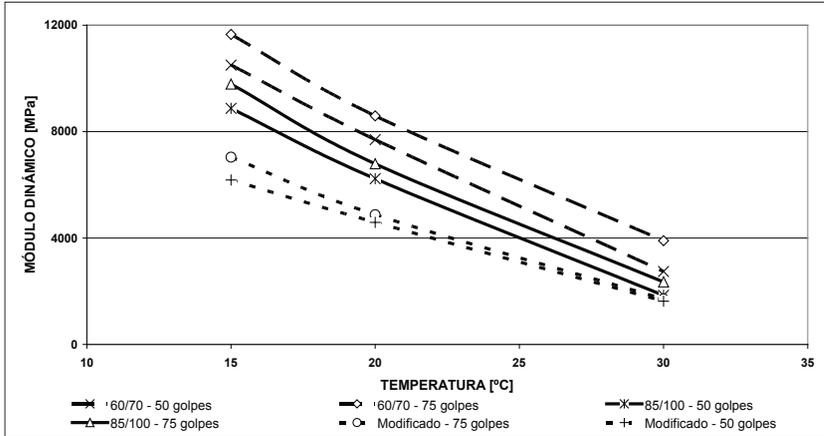


Figura 11. Módulos resilientes de las muestras fabricadas con asfalto 60/70, 85/100 y modificado

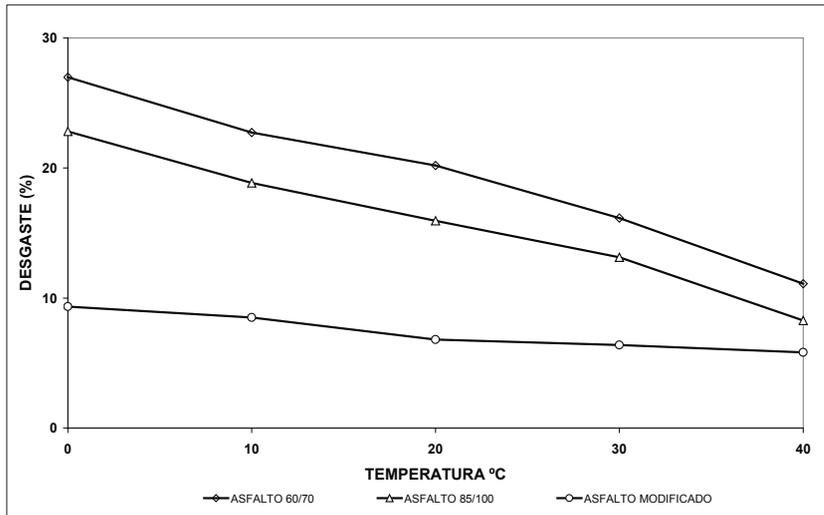


Figura 12. Cohesión obtenida mediante ensayos de UCL a los asfaltos 60/70, 85/100 y modificado

CONCLUSIONES

De los resultados de los ensayos realizados se puede concluir que el asfalto modificado presenta mejores propiedades mecánicas en cuanto a la resis-

tencia a la tracción indirecta, al ahuellamiento y a la cohesión (desgaste procedimiento UCL), sin importar la energía de compactación. Además, el asfalto 60/70 en los ensayos de módulo resiliente mostró mayores valores de resistencia sin importar el nivel de compactación (50 y 75 golpes por cara) ni la temperatura de ensayo.

Los asfaltos 85/100 y modificado, mediante el análisis del desplazamiento para obtener la resistencia máxima en el ensayo de tracción indirecta, muestran mayor ductilidad que el asfalto 60/70, lo cual puede indicar un posible comportamiento a la fatiga más favorable. En cuanto a los ensayos Cantabros (procedimiento UCL), el asfalto modificado presenta poca afectación por la temperatura del ensayo, lo cual indica que dadas las propiedades de la modificación del asfalto, éste genera una mayor cohesión en la mezcla.

La velocidad de deformación en el ensayo de ahuellamiento es mayor para los asfaltos convencionales (60/70 y 85/100) que para el asfalto modificado. Adicionalmente, se observa que la energía de compactación no afecta el resultado en el caso de la mezcla fabricada con el asfalto modificado.

Por último, es importante resaltar que dependiendo de las condiciones climatológicas, de las cargas del flujo vehicular, de las deformaciones de las capas del pavimento, entre otras variables, se debería hacer un análisis de costos de qué tipo de asfalto sería más rentable a la hora de construir una vía.

Referencias

- [1] R.F. Bonaquist, D.W. Christensen y W. Stump, National Cooperative Highway Research Program –NCHRP Report 513– *Simple performance tester for superpave mix design: first-article development and evaluation*. Washington: Transport Research Board, 2003.
- [2] A. Ruiz, I. Pérez, *Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas*. Monografía M-72, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas-CEDEX, 2002, p. 192.
- [3] F. Reyes L., *Diseño racional de pavimentos*, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.
- [4] Instituto Nacional de Vías, *Normas de ensayos para materiales de carreteras del Instituto Nacional de Vías*, Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2002.
- [5] CEDEX, *Normas Laboratorio de Transporte 346/90: Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas*. Madrid: CEDEX, 1990.

- [6] LCPC, *Determination of the fatigue resistance of bimunicipal mixtures - Two points bending test (constant sag) on isosceles trapezoidal probes*, Francia: LCPC, 1998, pp. 98-261-1.
- [7] R. Miro Recasens, "Metodología para la caracterización de ligantes asfálticos mediante el empleo del ensayo cántabro". Ph.D tesis, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 1994.
- [8] V. Baha Kok y N. Kuloglu, "The effect of different binders on mechanical properties of hot mix asphalt", *International Journal of science & technology*, vol. 2, N° 1, pp. 41-48, 2007.
- [9] K. Kanitpong y H. Hussein, "Relating adhesion and cohesion of asphalt to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures", *Transport Research Board 84th Annual meeting*, p. 25, 2005.
- [10] O. Reyes-Ortiz y J. Camacho. Influencia de la granulometría en la resistencia al ahueamiento de mezclas asfálticas, *Ingeniería & Desarrollo*, N° 23, pp. 26-42, enero-julio de 2008.
- [11] Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público de Bogotá: IDU, 2005.