

Evaluación de desempeño dinámico de una mezcla densa en caliente con más de veinte años de uso con la aplicación de un rejuvenecedor asfáltico

Dynamic performance evaluation of hot dense mix with more than twenty years of use with the application of an asphalt rejuvenator

Juan Cristóbal Neira C.¹, Andrea Fernanda Rengel C.², Alejandro Pérez F.³, Fredy Alberto Reyes L.⁴.

¹Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación (CECATA), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. juanneira@javeriana.edu.co, teléfono: 3197378479

²Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación (CECATA), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. andrea_rengel@javeriana.edu.co, teléfono: 3197427463

³Facultad de Química, Línea de Investigación ITAM (Tecnología ambiental y de materiales - ITAM), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. alejandroperez@javeriana.edu.co, teléfono: (57-1)-3208320 Ext. 4124

⁴Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de Investigación (Centro de Estudios en Carreteras Transporte y Afines - CECATA), Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. fredy.reyes@javeriana.edu.co, teléfono: (57-1)-3208320 Ext. 5270

Resumen

Este artículo presenta los cambios que experimenta una mezcla asfáltica y el asfalto extraído de esta, tomada de una calle de Bogotá al adicionarle un rejuvenecedor asfáltico. Las muestras de asfalto extraído con y sin rejuvenecedor se ensayaron mediante pruebas físicas, reológicas, químicas y calorimétricas. A la carpeta asfáltica extraída con y sin rejuvenecedor se le realizaron ensayos de desempeño dinámico, ahuellamiento, fatiga trapezoidal y módulo dinámico.

Con el uso de rejuvenecedor asfáltico se logró aumentar la ductilidad en un 551% frente al asfalto envejecido, disminuyendo la rigidez tanto del asfalto como de la mezcla asfáltica generado por el envejecimiento a corto y largo plazo. Para corroborar esta información se realizó ensayos químicos de Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier y calorimetría diferencial de barrido, los cuales nos indicaron una disminución del 13.08% en el porcentaje de asfaltenos de las muestras en las que se utilizó el rejuvenecedor asfáltico.

Palabras Clave

Rejuvenecedor Asfáltico, Mezcla asfáltica, Rigidez, Ductilidad, Caracterización dinámica

Abstract

This article presents the changes that an asphalt mixture experiences and the extracted asphalt from this folder, taken from one of the streets of Bogotá when adding an asphalt rejuvenator. The samples of extracted asphalt with and without rejuvenator were tested by physical, rheological, chemical and calorimetric tests. To the extracted asphalt folder with and without rejuvenator, tests were carried out of dynamic performance, rutting, trapezoidal fatigue and dynamic module were carried out.

With the use of an asphalt rejuvenator it was possible to increase the ductility by 551% compared to aged asphalt, decreasing the rigidity of both the asphalt and the asphalt mixture that had been generated by short and long-term aging. To corroborate this information, chemical tests of Fourier transform infrared spectrometry and differential scanning calorimetry were carried out, which indicated a decrease of 13.08% in the percentage of asphaltenes on the samples in which the asphalt rejuvenator was used.

Keywords

Asphalt Rejuvenator, Asphalt Mix, Rigidity, Ductility, Dynamic characterization.

1. Introducción

Desde la década de los 60, se ha investigado la manera de alargar la vida útil de la carpeta de rodadura, así como buscar la manera de disminuir los elevados costos que genera el mantenimiento vial o en su defecto la sustitución por una nueva carpeta de rodadura [I]. Prolongar la vida útil del pavimento es lo que prevalece hoy en día. El problema del asfalto es que se oxida con el tiempo y por lo tanto sus características iniciales se reducen significativamente y en efecto aumenta su rigidez y su capacidad de relajación disminuye. Esto ocurre principalmente como resultado de la oxidación [II-V].

Aunque esta situación se presenta desde el mismo momento en que se utilizó el asfalto para pavimentación, también se han buscado técnicas para rejuvenecer el concreto asfáltico en el sitio sin tener que demolerlo y para ello se han utilizado, rejuvenecedores asfálticos cuya función es proporcionarle al asfalto envejecido los componentes perdidos y devolverlo a sus condiciones originales, en su mayoría los rejuvenecedores son derivados del petróleo y carbón [VI-IX] que vienen desarrollándose desde el siglo XX hasta hoy en día. En 1960 la empresa petrolera Golden Bear introdujo al mercado un rejuvenecedor Reclamite®, el cual ayudó a sellar pavimentos asfálticos frente a agentes ambientales como aire y agua, desaceleró la oxidación disminuyendo el envejecimiento y mejoró su composición química aumentando la durabilidad del asfalto [I,III]. En el 2012 una investigación de laboratorio se enfocó en el efecto de un rejuvenecedor asfáltico en la restauración de las propiedades originales del pavimento envejecido por RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test); dando resultados favorables para la

investigación como por ejemplo el incremento del grado de penetración del asfalto envejecido y químicamente la estructura del asfalto se equilibra [X-XII].

Ya en recientes investigaciones la utilización de rejuvenecedores en mezclas asfálticas ha dado resultados favorables, considerando que su método de aplicación ha sido al momento de la fabricación de la mezcla asfáltica en caliente y utilizando un porcentaje de Rap (Pavimento asfáltico reciclado) [XIII-XV].

Al mercado colombiano ha llegado un producto rejuvenecedor de asfaltos el cual tiene la propiedad de conservación del pavimento. Este rejuvenecedor penetra en la carpeta de rodadura entrando en contacto con el asfalto y reponiendo los aceites perdidos en el proceso de oxidación [XVI,XVII]; que comúnmente se conoce como envejecimiento, equilibrando sus proporciones de asfaltenos y maltenos [XVIII,XIX]. En investigaciones mencionadas anteriormente, los rejuvenecedores fueron aplicados durante la fabricación de la mezcla asfáltica mientras que este producto se colocó directamente sobre la superficie de la carpeta de rodadura garantizando una penetración de un centímetro mínimo.

En esta investigación se realizó una serie de ensayos y análisis comparativos con las muestras de carpeta asfáltica obtenidas en campo antes y después de la colocación del producto, los ensayos realizados fueron físicos, reológicos, químicos, calorimétricos. Esta investigación brinda un aporte al evaluar el comportamiento dinámico y químico de una mezcla densa en caliente con más de veinte años de uso de la ciudad de Bogotá; aplicándole un rejuvenecedor asfáltico, y de esta manera obtener un mejor desempeño en su vida útil y disminuir los costos de

mantenimiento y reparación que son invertidos por el Estado.

2. Materiales y Métodos

Se utilizó una carpeta asfáltica envejecida naturalmente en el terreno, al que se le aplicaron tratamientos de rejuvenecimiento. Las muestras de asfalto extraído con y sin rejuvenecedor se ensayaron mediante pruebas físicas, reológicas, químicas y calorimétricas. Además de las pruebas sobre asfalto extraído, se aplicó rejuvenecedor a muestras de carpeta asfáltica y sobre ellas se realizaron ensayos de desempeño mecánico, ahuellamiento, fatiga trapezoidal y módulo dinámico. Para garantizar la confiabilidad de los datos se estableció que cada ensayo tuviera como mínimo tres repeticiones.

2.1 Descripción del material

La carpeta asfáltica envejecida se extrajo de una calle de la ciudad de Bogotá, con la colaboración de la Unidad de Mantenimiento Vial (UMV). La misma que fue cortada en piezas de 0.60 metros cuadrados aproximadamente, su espesor promedio fue de 8 (± 1) centímetros. Se obtuvo 5 metros cuadrados de carpeta asfáltica que se utilizó para realizar todos los ensayos. Se evaluó cualitativamente las muestras extraídas las cuales presentaron microfisuras hasta 1 mm de espesor. La carpeta asfáltica tuvo un tiempo de servicio de más de 20 años.

2.2 Dosificación del rejuvenecedor

La aplicación del rejuvenecedor se realizó tanto al asfalto extraído de la carpeta asfáltica envejecida como a la carpeta asfáltica cortada. Las proporciones recomendadas por la casa fabricante fueron 0.06 gal/yd², 0.065 gal/yd² y

0.07 gal/yd² equivalentes a 285.7 g/m², 309.5 g/m² y 333.3 g/m².

Con un previo análisis de los resultados reológicos obtenidos, los cuales se detallan más adelante, se concluyó que el asfalto con la dosificación de 309.5 g/m² tuvo un mejor comportamiento ante las cargas de corte aplicadas, por lo que esta dosificación se utilizó para los ensayos de ahuellamiento y fatiga trapezoidal que se realizaron sobre la carpeta asfáltica envejecida más la dosis mencionada de rejuvenecedor.

2.3 Fase experimental

Los ensayos se realizaron según la normativa vigente INVIAS 2013 [XX]. De este modo, las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

a) extracción cuantitativa del asfalto en mezclas en caliente, según la norma ASTM D2172/D2172M-11. Su objetivo fue extraer el asfalto de las muestras tomadas. Con los agregados obtenidos mediante este método se realizó el análisis granulométrico, según la norma ASTM D 5444-08; b) recuperación del asfalto de una solución utilizando un evaporador rotatorio, según la norma ASTM D 5404/D5404 M-11; c) análisis granulométrico: se utilizó para determinar la gradación de los agregados extraídos de la mezcla asfáltica; d) reometría de corte dinámico (DSR, equipo AR2000 exd de TA instruments®): lo primero fue obtener el grado de desempeño PG, se utilizaron muestras de 25 y 8 mm. como se describe en la norma AASHTO T 315-05, tanto del asfalto envejecido sin rejuvenecedor y el asfalto con las tres dosificaciones de rejuvenecedor a temperaturas bajas e intermedias de servicio, debido a que Colombia es un país de clima tropical. Los parámetros obtenidos fueron el módulo complejo de corte

(G^*) y el ángulo de fase (δ). El módulo complejo de corte es una medida de la resistencia total de un material a la deformación bajo esfuerzos de corte; el ángulo de fase es utilizado para comprender el comportamiento del material en relación a sus componentes elásticos y viscosos. A continuación, se realizó el ensayo Multiple Stress Creep Recovery (MSCR), se utilizó muestras de 25 mm. como se describe en la norma AASHTO D7450-10a. Los parámetros obtenidos fueron (JNR) (non recoverable creep compliance) que es la deformación permanente resultante al aplicar una unidad de esfuerzo. El tercer ensayo que se realizó fue de Barrido de Amplitud Lineal (LAS), se utilizaron muestras de 8 mm. como se describe en la norma AASHTO-TP-101. Este ensayo se realizó bajo temperaturas intermedias la cual se obtuvo del grado de desempeño PG. Con este ensayo se evaluó la capacidad del asfalto para resistir agrietamientos bajo cargas cíclicas de cizallamiento; e) caracterización física: penetración, según la norma ASTM D 5-06, viscosidad, según la norma AASHTO T 316-06, ductilidad, según la norma ASTM D 113-07, punto de ignición y llama según la norma ASTM D 92-11; f) gravedad específica máxima teórica [Gmm] y densidad de mezclas asfálticas para pavimentos, según la norma ASTM D2041/D2041M-11. Utilizado para determinar la gravedad específica máxima a 25°C (77° F); g) gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficie seca, según la norma ASTM D 2726-11. Los resultados obtenidos en este ensayo se utilizaron para calcular el peso unitario de las mezclas asfálticas densas compactadas y obtener el porcentaje de vacíos

con aire; h) resistencia de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall, según la norma ASTM D 6926-10. Este ensayo se utilizó para determinar la resistencia a la deformación plástica. Se utilizó muestras de forma cilíndrica con un diámetro de 4" sometidos a carga en dirección perpendicular a su eje cilíndrico, es decir obteniendo la estabilidad y flujo; i) módulo dinámico (equipo NAT HYD 10), según norma UNE-EN 12697-26:2012 Parte F. Este ensayo se utilizó para determinar valores del módulo resiliente, aplicando ensayo de tensión indirecta con carga repetida; j) ahuellamiento, según norma UNE-EN 12697-26:2012 Parte E. Este ensayo se utilizó para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica la cual está asociada a la aplicación repetida de cargas del tránsito; k) fatiga trapezoidal. Este ensayo se realizó bajo la norma europea NFP98-2611 el mismo que analiza la evolución del comportamiento de la resistencia a la fatiga; este equipo utiliza un mecanismo de flexión por tracción; l) calorimetría diferencial de barrido DSC, según norma ASTM C 351. Es una técnica experimental dinámica que permite el estudio en los procesos de variación de temperatura donde ocurren cambios físicos y químicos, puntos de cristalización, ebullición y otras transiciones; m) espectrometría infrarroja por transformada de Fourier FTIR: este ensayo permitió identificar grupos funcionales de determinadas estructuras de muestras.

3. Resultados y análisis

3.1 Caracterización física

De la extracción del asfalto se encontró que el porcentaje de asfalto en la carpeta asfáltica en estudio fue del 5.5%.

Con el agregado que se recuperó de la extracción del asfalto se realizó la granulometría, se obtuvo como dato que el tamaño máximo nominal del agregado fue 1 pulgada, este dato sirvió para conocer el tamaño de las probetas del ensayo de fatiga trapezoidal.

En la tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización física realizados al asfalto [XXI,X], con y sin la aplicación del rejuvenecedor asfáltico.

Tabla 1. Caracterización física del asfalto.

Ensayo	Unidades	Sin rejuvenecedor	Con rejuvenecedor
Penetración (25°C, 100g, 5s)	0,1 mm	14,08	40,50
Viscosidad Absoluta (135°C)	Pa-s	1,56	0,61
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	7,5	48,85
Punto de ignición	°C	296	220,5
Punto de llama	°C	322	230

Como se observa en los resultados reportados con la aplicación del rejuvenecedor asfáltico los valores aumentan considerablemente, que si bien es cierto no cumplen con las especificaciones de la norma INVIAS de un asfalto convencional, pero da un indicio del rejuvenecimiento del asfalto; indicando el aumento de la ductilidad y disminución en la rigidez de los mismos.

3.2 Caracterización reológica

Los ensayos de caracterización reológica fueron: PG (grado de desempeño), MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) y LAS (Barrido de Amplitud Lineal). Estos tres ensayos fueron realizados con asfaltos sin rejuvenecedor y con las tres dosificaciones de rejuvenecedor mencionadas anteriormente. Nunca se sometió al asfalto en las cámaras RTFOT ni RTFOT+PAV puesto que el asfalto extraído ya estaba en condiciones de uso de más de 20 años.

PG (Grado de desempeño). De la tabla 2 a la tabla 5 se indica el grado de desempeño a altas e intermedias temperaturas de servicio de los asfaltos.

Tabla 2. Caracterización reológica del asfalto sin rejuvenecedor a temperaturas altas e intermedias.

Temperatura (°C)	Frecuencia (rad/s)	δ (°)	G* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* \cdot \text{sen}\delta$ (KPa)
Asfalto sin rejuvenecedor 80/90 temperaturas altas					
82,0	10	84	2466	2,5	2,5
88,0	10	86	1222	1,2	1,2
94,0	10	87	606	0,6	0,6
Asfalto sin rejuvenecedor 80/90 temperaturas altas					
76,0	10	82	5664	5,7	5,6
82,0	10	84	2449	2,5	2,4
88,0	10	86	1211	1,2	1,2
Asfalto sin rejuvenecedor 80/90 temperaturas intermedias					
19,0	10	37	11746000	19305,0	7147,2
22,0	10	40	8280900	12786,0	5363,4
25,0	10	43	5639200	8193,2	3881,7

Tabla 3. Caracterización reológica del asfalto con dosificación de 285.7 g/m² de rejuvenecedor a temperaturas altas e intermedias.

Temperatura (°C)	Frecuencia (rad/s)	δ (°)	G* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* \cdot \text{sen}\delta$ (KPa)
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
64,0	10	83	3413	3,4	3,4
70,0	10	86	1483	1,5	1,5
76,0	10	87	822	0,8	0,8
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
58,0	10	81	7024	7,1	6,9
64,0	10	83	3264	3,3	3,2
70,0	10	86	1332	1,3	1,3
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas medias					
10,0	10	39	10635000	17042,0	6638,1
13,0	10	41	7437200	11270,0	4907,6
16,0	10	44	5219100	7516,0	3623,9

Tabla 4. Caracterización reológica del asfalto con dosificación de 309.5 g/m² de rejuvenecedor a temperaturas altas e intermedias.

Temperatura (°C)	Frecuencia (rad/s)	δ (°)	G^* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* * \text{sen}\delta$ (KPa)
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
64,0	10	84	2924	2,9	2,9
70,0	10	85	2225	2,2	2,2
76,0	10	87	924	0,9	0,9
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
58,0	10	82	5819	5,9	5,8
64,0	10	84	2835	2,9	2,8
70,0	10	85	2158	2,2	2,1
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas medias					
10,0	10	39	11254000	17719,0	7150,5
13,0	10	42	7880400	11728,0	5295,6
16,0	10	45	5166400	7251,6	3680,8

Tabla 5. Caracterización reológica del asfalto con dosificación de 333.3 g/m² de rejuvenecedor a temperaturas altas e intermedias.

Temperatura (°C)	Frecuencia (rad/s)	δ (°)	G^* (Pa)	$ G^* /\text{sen}\delta$ (KPa)	$ G^* * \text{sen}\delta$ (KPa)
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
64,0	10	84	2529	2,5	2,5
70,0	10	86	1287	1,3	1,3
76,0	10	87	681	0,7	0,7
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas altas					
58,0	10	82	5355	5,4	5,3
64,0	10	84	2656	2,7	2,6
70,0	10	86	1335	1,3	1,3
Asfalto con rejuvenecedor 60/70 temperaturas medias					
10,0	10	39	10677000	16870,0	6755,8
13,0	10	42	7574500	11348,0	5055,7
16,0	10	45	5048000	7134,6	3571,5

Se puede observar en la tabla 2, para un asfalto sin rejuvenecedor fue necesario llevar este ensayo a temperaturas de 88° centígrados para encontrar un $|G^*| * \text{sen}\delta \geq 1.2$ KPa, mientras que el asfalto con la adición del rejuvenecedor solamente llegó a temperaturas de 70° centígrados. Un asfalto envejecido se encuentra rígido, por lo tanto, va a necesitar mayor temperatura, mientras que un asfalto nuevo está mucho más dúctil, como se observa en las tablas 3, 4 y 5.

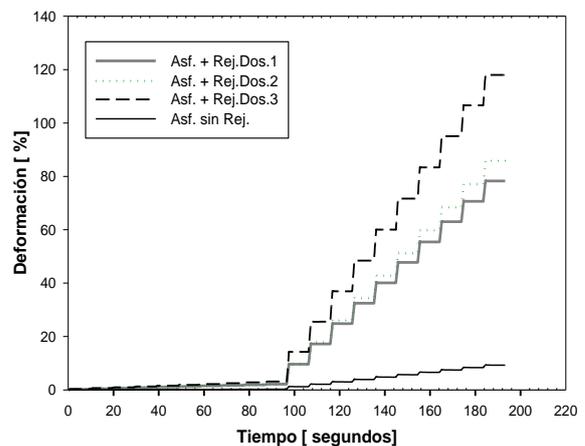
MSCR (Multiple Stress Creep Recovery). En la figura 1 se indica los resultados obtenidos del ensayo MSCR, donde se muestra la condición de tráfico a la que el asfalto puede llegar a soportar a lo largo de su vida útil. Cabe mencionar que con los datos obtenidos de este

ensayo se pudo obtener el valor de JNR, que es la deformación permanente resultante al aplicar una unidad de esfuerzo, cuanto menor es el JNR menor será la deformación permanente en el asfalto.

Tabla 6. Parámetro JNR.

Asfalto	Jnr, 3.2 Kpa
Asfalto sin rejuvenecedor	0,28
Asfalto con rejuvenecedor dos. 1	2,38
Asfalto con rejuvenecedor dos. 2	2,62
Asfalto con rejuvenecedor dos. 3	3,59

Figura 1. MSCR (Multiple Stress Creep Recovery).

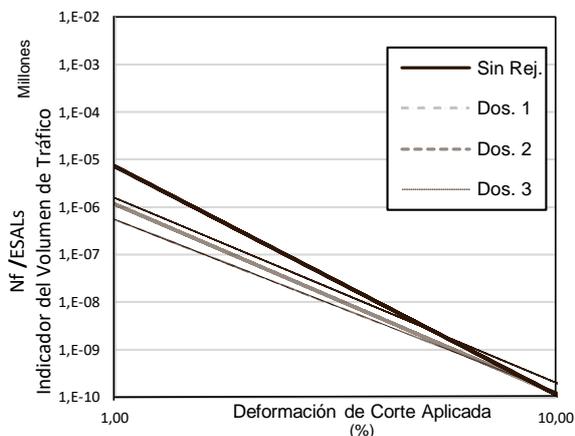


Como se puede observar en la figura 1, en el asfalto sin el rejuvenecedor alcanza una deformación del 9 %, con la primera dosificación de rejuvenecedor 78 %, con la segunda dosificación 86 % y con la tercera dosificación 118 %. El asfalto cuando está envejecido se encuentra rígido, por lo tanto, es difícil llegar a deformaciones altas, se observa que con el uso del rejuvenecedor se alcanzó

altas deformaciones y el asfalto recuperó su ductilidad.

LAS (Barrido de Amplitud Lineal). En la figura 2 del ensayo LAS se indica la vida a la fatiga del asfalto frente a la deformación por cizallamiento a las temperaturas intermedias antes obtenidas en el grado de desempeño [XXII].

Figura 2. LAS (Barrido de amplitud lineal).



Como se observa en la figura 2, el material que no lleva rejuvenecedor es el que mayor volumen de tráfico soporta, esto se da debido a que el incremento de rigidez genera un incremento en la vida a fatiga de la mezcla tan solo por el efecto de rigidización del ligante asfáltico producto del envejecimiento del mismo [XXIII].

Con los resultados obtenidos de los tres ensayos de DSR se concluyó que tomando en cuenta la temperatura promedio de Bogotá 15 °C aproximadamente, la dosificación dos de 309.5 g/m² fue la más favorable sometiéndole a comportamientos de resistencia a la deformación permanente en climas de alta e intermedia temperatura, y su mejoría ante deformaciones acumuladas después de 20 ciclos de carga y descarga, así como su disminución en la vida a fatiga frente a deformaciones por cizallamiento a

temperaturas intermedias, observando de esa manera una recuperación en su ductilidad y disminución en su fragilidad frente al asfalto sin rejuvenecedor conllevando a claros síntomas de rejuvenecimiento.

3.3 Caracterización dinámica de la mezcla

Indica el comportamiento dinámico de la mezcla. En la tabla 7 se observa los siguientes resultados.

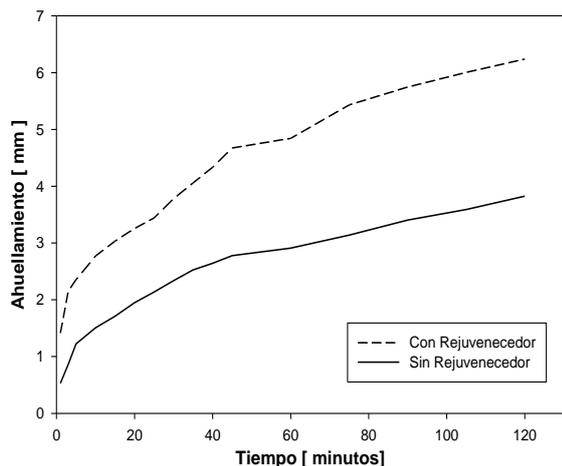
Tabla 7. Caracterización mecánica de la mezcla.

Ensayo	Unidades	Sin rejuvenecedor	Con rejuvenecedor
Gravedad específica Bulk.	gr/cm ³	2,04	1,99
Densidad.	gr/cm ³	2,03	1,98
Porcentaje de agua absorbida por vol.	%	1,74	1,22
Gravedad específica de la mezcla Gmm	gr/cm ³	2,58	2,25
Estabilidad/Flujo Marshall.	KN/mm	2,34	3,18

Con los resultados obtenidos se puede analizar que la gravedad específica Bulk, densidad, porcentaje de agua absorbida y la gravedad específica de la mezcla al adicionar el rejuvenecedor genera una disminución en sus valores, esto ocurre porque al penetrar el rejuvenecedor en la carpeta asfáltica crea una impermeabilización y rellena los vacíos que podían existir, impidiendo que el agua ingrese de manera agresiva a dichos especímenes con los cuales se realizó estos ensayos; mismo efecto que se puede observar en los ensayos de estabilidad y flujo provocando resistencias más altas al momento de utilizar el rejuvenecedor asfáltico; indicio con el cual se indica mejoría en la mezcla.

Ahuellamiento. En la figura 3 se indica la resistencia a la deformación plástica del material [XXIV], con y sin rejuvenecedor.

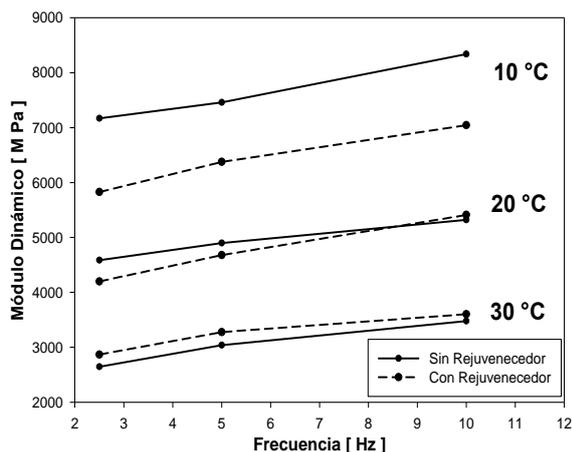
Figura 3. Ahuellamiento de la mezcla con y sin la aplicación de rejuvenecedor.



En los resultados de ahuellamiento es fácil observar que cuando se adicionó el rejuvenecedor asfáltico sobre la carpeta que se iba a ensayar la curva de ahuellamiento producida alcanzó una deformación de 6,24 mm. mientras que sin rejuvenecedor su deformación alcanzada fue de 3,82 mm. Demostrando que el rejuvenecedor devolvió la ductilidad al material envejecido.

Módulo Dinámico. En la figura 4 se muestra los valores de módulo resiliente a diferentes temperaturas y frecuencias [XXV,XXVI], ensayados sobre la carpeta con y sin rejuvenecedor.

Figura 4. Módulo dinámico con y sin la aplicación de rejuvenecedor.

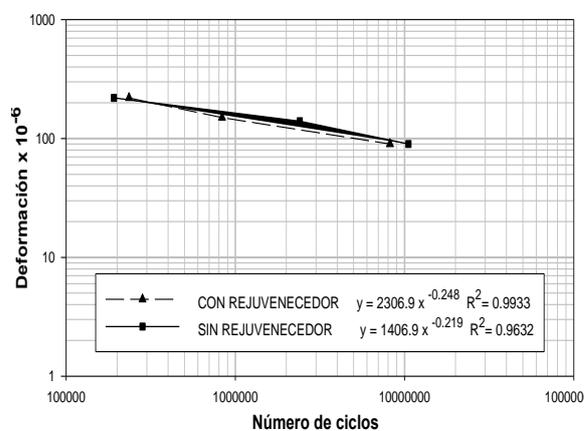


Para una temperatura promedio de 15° centígrados como es la de Bogotá el módulo dinámico tiene un valor de 5400 MPa, [XXVII]. Se realizó este ensayo y las muestras sin rejuvenecedor tuvieron un módulo dinámico de 6831 MPa a una temperatura de 15° centígrados, mientras que las muestras aplicadas el rejuvenecedor dieron valores de 6229 MPa. Debido a la disminución del valor del módulo dinámico con el uso del rejuvenecedor asfáltico, se disminuye la rigidez del material y está asociada al aumento en la ductilidad del asfalto [XXIII], nuevamente indicando rejuvenecimiento.

Fatiga. Para realizar este ensayo se utilizó una frecuencia de 10 Hz a temperatura ambiente y tres niveles de amplitud 90µm, 150µm y 220µm con el fin de obtener las leyes de fatiga [28,29].

Para los cortes de las probetas de fatiga se utilizó la norma francesa NFP-98-2611; utilizando como base el tamaño máximo de 1” el cual se obtuvo del análisis granulométrico.

Figura 5. Fatiga trapezoidal con y sin la aplicación de rejuvenecedor.



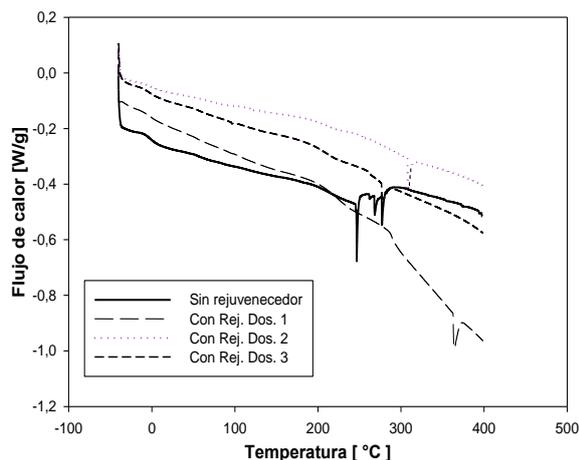
Los resultados obtenidos del ensayo de fatiga trapezoidal fueron los siguientes: sin rejuvenecedor $\epsilon_6 = 80.2$ y $b = 0.219$; con rejuvenecedor $\epsilon_6 = 75$ y $b = 0.248$. Como se

observa en la figura 5, la gráfica de la muestra sin rejuvenecedor alcanzo mayor número de ciclos; en investigaciones realizadas con mezclas asálticas en la ciudad de Bogotá, se observó que debido al incremento de rigidez se genera un incremento en la vida a fatiga de la mezcla tan solo por el efecto de rigidización del ligante asfáltico producto del envejecimiento del mismo, [XXIII]. De esta manera se puede decir que el rejuvenecedor está actuando de manera positiva.

3.5 Caracterización calorimétrica

En la figura 6 se detalla el ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC), donde se observa la transición vítrea y punto de fusión, la cual consiste en representar el cambio que tiene la muestra ensayada, de un comportamiento dúctil a uno frágil o viceversa [XXX].

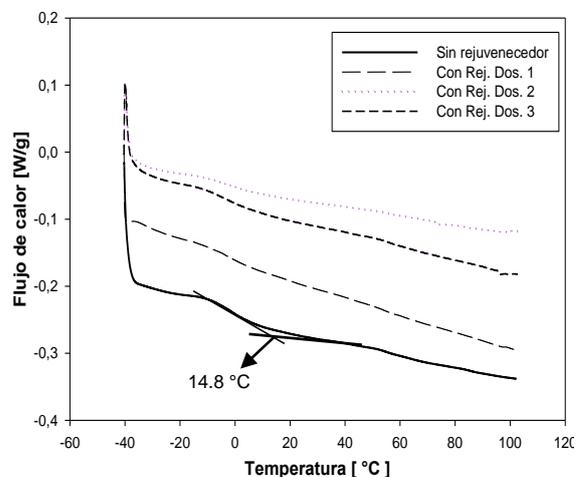
Figura 6. DSC con y sin la aplicación de rejuvenecedor.



De la figura 6, se pudo concluir que las muestras que llevaron un porcentaje de rejuvenecedor especialmente las dosificaciones uno y dos presentaron una variación en las transiciones vítreas y punto de fusión, generando en su microestructura un

acomodo en sus moléculas, lo cual indica que el asfalto ganó ductilidad, mientras que la muestra sin rejuvenecedor presentó varios picos a bajas temperaturas indicándonos fragilidad y desacomodo de las moléculas.

Figura 7. DSC detalle transición vítrea.



La temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá es de 15° centígrados, la mezcla sin rejuvenecedor se está fatigando cuando bordea esta temperatura y esto se constata con el cambio de pendiente que presenta en la figura 7; con la segunda dosificación el material es mucho más flexible, eliminándose su transición vítrea.

3.4 Caracterización química

En la figura 8 se muestran los resultados del ensayo de espectrometría infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), los resultados del análisis de grupos funcionales del asfalto sin rejuvenecedor y con rejuvenecedor, a partir de la espectroscopia infrarroja se indican en términos de transmitancia y número de onda.

De acuerdo con los espectros infrarrojos, las señales de los grupos carbonilos C=O y sulfóxidos S=O se denota en pequeños picos situados en 1705 y 1040 cm^{-1} respectivamente

[XXXI,XXXII], teniendo los siguientes resultados:

Figura 8. Espectrometría infrarroja FTIR asfalto sin rejuvenecedor.

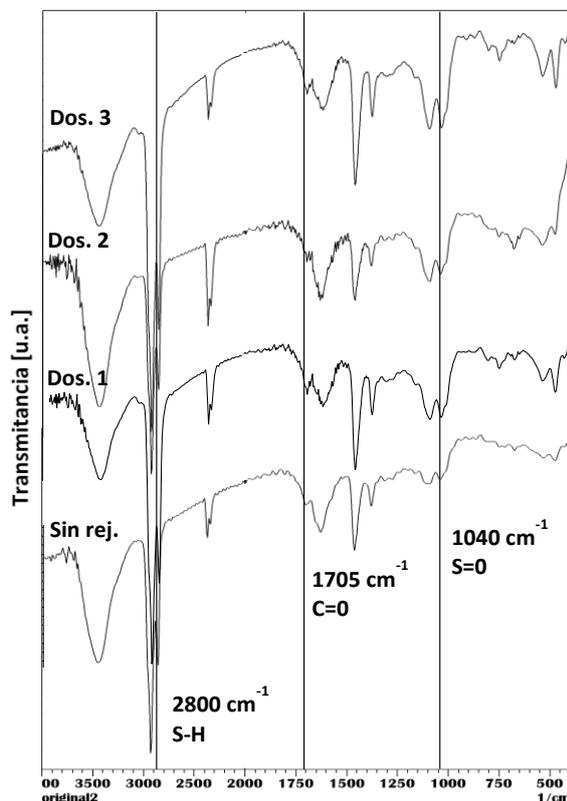


Tabla 8. Intensidad de los grupos funcionales.

Grupo funcional	Longitud onda cm ⁻¹	Pico	Pico	Pico	Pico
		sin rej.	dos. 1	dos. 2	dos. 3
Carbonilos	1705	19,75	20,84	11,79	18,42
Sulfóxidos	1040	21,39	19,87	11,55	17,57
Saturados	2800	18,38	19,64	11,42	17,21

En la tabla 8 se observa que los carbonilos y sulfóxidos al utilizar el rejuvenecedor de asfaltos disminuye su intensidad con respecto al asfalto sin el rejuvenecedor, alcanzado su valor más bajo con la segunda dosificación. Cuando se produce el envejecimiento de asfaltos se eleva la cantidad de carbonilos y sulfóxidos.

Con la relación de señales de los grupos funcionales de carbonilos y sulfóxidos entre saturados se tiene los siguientes resultados:

Tabla 9. Relación de carbonilos y sulfóxidos sobre saturados.

	asfalto sin rej.	asfalto dos.1	% decremento	asfalto dos.2	% decremento	asfalto dos.3	% decremento
carbonilo saturados	1,07	1,06	1,24	1,03	3,88	1,07	0,42
sulfóxido saturados	1,16	1,01	13,07	1,01	13,08	1,02	12,31

Se observa en la tabla 9 que existe una disminución de asfaltenos con las dosificaciones de rejuvenecedor, la cual es más notoria al relacionar las señales de sulfóxidos con los saturados, alcanzando un decremento de 1.01 frente a un asfalto sin el rejuvenecedor cuyo valor es de 1.16. Lo cual confirma el rejuvenecimiento del asfalto con el uso del producto [XXXIII,XXXIV].

4. Conclusiones

El producto rejuvenecedor asfáltico mejoró las propiedades del asfalto y de la mezcla frente a los ensayos realizados, en la mayoría de ensayos aumento su ductilidad dando señales de rejuvenecimiento. Si bien es cierto que no se restableció hasta los parámetros exigidos por el INVIAS o el ASTM pero se debe considerar que se aplicó y ensayó sobre una mezcla asfáltica de más de veinte años de servicio.

Con el análisis de resultados obtenidos del ensayo de LAS y fatiga trapezoidal se logra ver el rejuvenecimiento del asfalto debido a que este está directamente relacionado al decremento de la rigidez producida por el aumento en su ductilidad al rejuvenecerse, mismo efecto observado en los ensayos de modulo dinámico y ahuellamiento.

De las relaciones de intensidad entre los grupos sulfóxidos/saturados y carbonilos/saturados; se nota claramente que existe una disminución de la cantidad de estos grupos funcionales, indicando el rejuvenecimiento de la muestra asfáltica. Estos datos se correlacionan perfectamente con los resultados obtenidos de los ensayos reológicos, mecánicos, físicos y calorimétricos; en donde la disminución de grupos funcionales como sulfóxidos y carbonilos (asfaltenos) permiten una mejora en estas propiedades, es decir si existe un rejuvenecimiento.

5. Referencias

- I. Brownridge, J. (2010). The role of an asphalt rejuvenator in pavement preservation: use and need for asphalt rejuvenation. In *Compendium of papers from the first international conference on pavement preservation*. pp. 351-364
- II. Ardila, A. A., & Granados, S. P. (2012). Envejecimiento de mezclas asfálticas 60-70 y 80-100 a largo plazo. Tesis de maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- III. Figueroa, A. S. Investigación sobre el efecto del agua en el asfalto y su impacto en la mezcla asfáltica.
- IV. Rondón, H. A., Reyes, F. A., & Vacca, H. A. (2010). Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá. *Revista EIA*, 7(14), 135-145
- V. Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27-44.
- VI. Cong, P., Hao, H., Zhang, Y., Luo, W., & Yao, D. (2016). Investigation of diffusion of rejuvenator in aged asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(4), 280-288. doi:10.1016/j.ijprt.2016.08.001.
- VII. Garcia, A., Jelfs, J., & Austin, C. J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, 101, 309-316. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.062.
- VIII. Mokhtari, A., Lee, H. D., Williams, R. C., Guymon, C. A., Scholte, J. P., & Schram, S. (2017). A novel approach to evaluate fracture surfaces of aged and rejuvenator-restored asphalt using cryo-SEM and image analysis techniques. *Construction and Building Materials*, 133, 301-313. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.075.
- IX. Nayak, P., & Sahoo, U. C. (2015). A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil. *International Journal of Pavement Engineering*, 133, 1-13. doi:10.1080/10298436.2015.1103851.
- X. Rondón, H. A., Reyes, F. A. (2015). Pavimentos materiales, construcción y diseño. Bogotá Colombia, ECOE EDICIONES. 574.
- XI. Severance, R., Porot, L., Felipe, J., & López, J. (2014). Empleo de rejuvenecedores en reciclado de mezclas bituminosas. *Asfalto Y Pavimentación*, 14(4), 39-49.
- XII. Tanzadeha, R., & Arabanib, M. (2012). Laboratory Study on the Effect of Asphalt Emulsion as a Rejuvenator in Aged Asphalt Pavement. In *Advanced Materials Research (Vol. 587, pp. 57-61)*. Trans Tech Publications. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.587.57.

- XIII. Ali, A. W., Mehta, Y. A., Nolan, A., Purdy, C., & Bennert, T. (2016). Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. *Construction and Building Materials*, 110, 211-217. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.013.
- XIV. Im, S., Fujie, Z., Lee, R., & Scullion, T. (2014). Impacts of rejuvenators on performance and engineering properties of asphalt mixtures containing recycled materials. *Construction and Building Materials*, 53, 596-603. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.025.
- XV. Kim, Y. R., Haghshenas, H. F., & Nabizadeh, H. (2016). The Effect of Rejuvenators on RAP Mixtures: A Study Based on Multiple Scale Laboratory Test Results. In *Geo-Chicago 2016* (pp. 697-707). doi:10.1061/9780784480137.066.
- XVI. Borges, O. "Los Asfaltenos y sus efectos en la producción de petróleo". 2013. Recuperado de: <http://www.portaldelpetroleo.com/2013/04/los-asfaltenos-y-sus-efectos-en-la.html>
- XVII. Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón, H. A. (2012). Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *Revista EIA*, 9(17), 47-56.
- XVIII. Ortiz, O. J. R., Lizcano, F. A. R., & Rivera, J. R. T. (2010). Efecto de la presión de contacto y la temperatura en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica. *Ingeniería y Universidad: Engineering for Development*, 10(1).
- XIX. Plaza, S. C., & Rincón, G. T. (2014). Estudio de la susceptibilidad al daño por humedad de una Mezcla asfáltica para rodadura utilizando asfalto 80-100 y su Relación con el desempeño de campo (Master's thesis).
- XX. Instituto Nacional de Vías – INVIAS. [en línea]. Disponible: www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos1/139-documento-tecnicos/1988especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras.
- XXI. Figueroa, A. S., Sánchez, A., & Reyes, F. A. (2007). Caracterización física de un asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada. *Épsilon*, (9), 41-55.
- XXII. Reyes, O. J., & Pérez, F. E. (2011). Estudio del comportamiento a fatiga de asfaltos mediante el uso del reómetro de corte dinámico. *Ingeniería e Investigación*, 31(1), 47-55
- XXIII. Rondón Quintana, H. A., & Reyes Lizcano, F. A. (2012). Evaluación de los parámetros mecánicos de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá DC. *Revista ingeniería de construcción*, 27(1), 57-74.
- XXIV. Rodríguez, K. L. (2014). Mejora de una mezcla asfáltica drenante con adición de caucho e icopor (Bachelor's thesis).
- XXV. Dussán, E., & Flautero, F. (2005). Automatización de ensayos dinámicos del laboratorio de pavimentos en el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester) de la Pontificia Universidad Javeriana (Bachelor's thesis).
- XXVI. Parra, Á. O., Cepeda, S. M. (2012). Variación de las propiedades dinámicas de las mezclas elaboradas con asfaltos colombianos 60-70 y 80-100, después de ser sometidas a procesos de envejecimiento de corto plazo. Tesis de

- maestría en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- XXVII. Reyes, F. A. (2012). *Diseño Racional de Pavimentos*. Bogotá Colombia. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 584.
- XXVIII. Roncallo, S. P., & Bautista, F. (2013). *Desempeño a Fatiga y Ahuellamiento de Mezclas en Servicio en la Ciudad de Bogotá, Comparadas con Mezclas Envejecidas en Laboratorio en Cámara UV*.
- XXIX. Silva, V., & Steve, J. (2012). *Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión*.
- XXX. Aguiar, J. P., Salazar, J., García, A., Baldi, A., Bonilla, V. & Loría, L. G., (2017). *Efecto del envejecimiento sobre las propiedades micromecánicas del asfalto mediante microscopía de fuerza atómica*.
- XXXI. Gamarra Escamilla, A. (2014). *Envejecimiento termo-oxidativo de asfaltos* (Master's thesis, Universidad EAFIT).
- XXXII. Múnera Ossa, J. C. (2012). *Modificación polimérica de asfaltos* (Master's thesis, Universidad EAFIT).
- XXXIII. Fernández, W. D., Rondón, H. A., Daza, C. E., & Reyes, F. A. (2014). *The effects of environmental aging on Colombian asphalts*. Fuel, 115, 321-328.
- XXXIV. García Melo, W. *Estudio de la influencia del asfalto envejecido en el comportamiento mecánico de una mezcla de concreto asfáltico producida en caliente* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).

acuerdo con los usos honrados, de manera proporcional y justificada a la finalidad perseguida, sin ánimo de lucro ni de comercialización.

De manera complementaria, garantizo (garantizamos) en mi (nuestra) calidad de estudiante (s) y por ende autor (es) exclusivo (s), que la Tesis o Trabajo de Grado en cuestión, es producto de mi (nuestra) plena autoría, de mi (nuestro) esfuerzo personal intelectual, como consecuencia de mi (nuestra) creación original particular y, por tanto, soy (somos) el (los) único (s) titular (es) de la misma. Además, aseguro (aseguramos) que no contiene citas, ni transcripciones de otras obras protegidas, por fuera de los límites autorizados por la ley, según los usos honrados, y en proporción a los fines previstos; ni tampoco contempla declaraciones difamatorias contra terceros; respetando el derecho a la imagen, intimidad, buen nombre y demás derechos constitucionales. Adicionalmente, manifiesto (manifestamos) que no se incluyeron expresiones contrarias al orden público ni a las buenas costumbres. En consecuencia, la responsabilidad directa en la elaboración, presentación, investigación y, en general, contenidos de la Tesis o Trabajo de Grado es de mí (nuestro) competencia exclusiva, eximiendo de toda responsabilidad a la Pontificia Universidad Javeriana por tales aspectos.

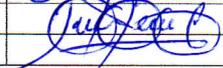
Sin perjuicio de los usos y atribuciones otorgadas en virtud de este documento, continuaré (continuaremos) conservando los correspondientes derechos patrimoniales sin modificación o restricción alguna, puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación de los derechos patrimoniales derivados del régimen del Derecho de Autor.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables. En consecuencia, la Pontificia Universidad Javeriana está en la obligación de RESPETARLOS Y HACERLOS RESPETAR, para lo cual tomará las medidas correspondientes para garantizar su observancia.

NOTA: Información Confidencial:

Esta Tesis o Trabajo de Grado contiene información privilegiada, estratégica, secreta, confidencial y demás similar, o hace parte de una investigación que se adelanta y cuyos resultados finales no se han publicado. Si No

En caso afirmativo expresamente indicaré (indicaremos), en carta adjunta, tal situación con el fin de que se mantenga la restricción de acceso.

NOMBRE COMPLETO	No. del documento de identidad	FIRMA
ANDREA FERNANDA RENGEL CORONEL	0105495352	
JUAN CRISTÓBAL NEIRA CARRERA	0103988150	

FACULTAD: INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA ACADÉMICO: MAESTRÍA DE INGENIERÍA CIVIL

ANEXO 3
BIBLIOTECA ALFONSO BORRERO CABAL, S.J.
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO
FORMULARIO

TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS DOCTORAL O TRABAJO DE GRADO						
EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DINÁMICO DE UNA MEZCLA DENSA EN CALIENTE CON MÁS DE VEINTE AÑOS DE USO CON LA APLICACIÓN DE UN REJUVENECEDOR ASFÁLTICO						
SUBTÍTULO, SI LO TIENE						
AUTOR O AUTORES						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
RENGEL CORONEL			ANDREA FERNANDA			
NEIRA CARRERA			JUAN CRISTÓBAL			
DIRECTOR (ES) TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO						
Apellidos Completos			Nombres Completos			
REYES LIZCANO			FREDY ALBERTO			
PÉREZ FLÓREZ			ALEJANDRO			
FACULTAD						
INGENIERÍA CIVIL						
PROGRAMA ACADÉMICO						
Tipo de programa (seleccione con "x")						
Pregrado	Especialización	Maestría		Doctorado		
		X				
Nombre del programa académico						
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL						
Nombres y apellidos del director del programa académico						
FEDERICO ALEJANDRO NUÑEZ MORENO						
TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:						
MASTER EN INGENIERÍA CIVIL						
PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):						
CIUDAD		AÑO DE PRESENTACIÓN DE LA TESIS O DEL TRABAJO DE GRADO			NÚMERO DE PÁGINAS	
BOGOTÁ		2018			14	
TIPO DE ILUSTRACIONES (seleccione con "x")						
Dibujos	Pinturas	Tablas, gráficos y diagramas	Planos	Mapas	Fotografías	Partituras
		X				
SOFTWARE REQUERIDO O ESPECIALIZADO PARA LA LECTURA DEL DOCUMENTO						
Nota: En caso de que el software (programa especializado requerido) no se encuentre licenciado por la Universidad a través de la Biblioteca (previa consulta al estudiante), el texto de la Tesis o Trabajo de Grado quedará solamente en formato PDF.						

MATERIAL ACOMPAÑANTE					
TIPO	DURACIÓN (minutos)	CANTIDAD	FORMATO		
			CD	DVD	Otro ¿Cuál?
Vídeo					
Audio					
Multimedia					
Producción electrónica					
Otro Cuál?					
DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVE EN ESPAÑOL E INGLÉS					
Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. <i>(En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Sección de Desarrollo de Colecciones de la Biblioteca Alfonso Borrero Cabal S.J en el correo biblioteca@javeriana.edu.co, donde se les orientará).</i>					
ESPAÑOL			INGLÉS		
REJUVENECEDOR ASFÁLTICO			ASPHALT REJUVENATOR		
MEZCLA ASFÁLTICA			ASPHALT MIX		
RIGIDEZ			RIGIDITY		
DUCTILIDAD			DUCTILITY		
CARACTERIZACIÓN DINÁMICA			DYNAMIC CHARACTERIZATION		
RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS (Máximo 250 palabras - 1530 caracteres)					
<p>Este artículo presenta los cambios que experimenta una mezcla asfáltica y el asfalto extraído de esta, tomada de una calle de Bogotá al adicionarle un rejuvenecedor asfáltico. Las muestras de asfalto extraído con y sin rejuvenecedor se ensayaron mediante pruebas físicas, reológicas, químicas y calorimétricas. A la carpeta asfáltica extraída con y sin rejuvenecedor se le realizaron ensayos de desempeño dinámico, ahuellamiento, fatiga trapezoidal y módulo dinámico.</p> <p>Con el uso de rejuvenecedor asfáltico se logró aumentar la ductilidad en un 551% frente al asfalto envejecido, disminuyendo la rigidez tanto del asfalto como de la mezcla asfáltica generado por el envejecimiento a corto y largo plazo. Para corroborar esta información se realizó ensayos químicos de Espectrometría infrarroja por transformada de Fourier y calorimetría diferencial de barrido, los cuales nos indicaron una disminución del 13.08% en el porcentaje de asfaltenos de las muestras en las que se utilizó el rejuvenecedor asfáltico.</p> <p>This article presents the changes that an asphalt mixture experiences and the extracted asphalt from this folder, taken from one of the streets of Bogotá when adding an asphalt rejuvenator. The samples of extracted asphalt with and without rejuvenator were tested by physical, rheological, chemical and calorimetric tests. To the extracted asphalt folder with and without rejuvenator, tests were carried out of dynamic performance, rutting, trapezoidal fatigue and dynamic module were carried out.</p> <p>With the use of an asphalt rejuvenator it was possible to increase the ductility by 551% compared to aged asphalt, decreasing the rigidity of both the asphalt and the asphalt mixture that had been generated by short and long-term aging. To corroborate this information, chemical tests of Fourier transform infrared spectrometry and differential scanning calorimetry were carried out, which indicated a decrease of 13.08% in the percentage of asphaltene on the samples in which the asphalt rejuvenator was used.</p>					

ANEXO 4
MODELO PARA LA MARCACIÓN DE LA CAJA DEL CD-ROM O DVD



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

TRABAJO DE GRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
2018

Juan Cristóbal Neira Carrera
Andrea Fernanda Rengel Coronel

**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DINÁMICO DE UNA MEZCLA
DENSE EN CALIENTE CON MÁS DE VEINTE AÑOS DE USO CON
LA APLICACIÓN DE UN REJUVENECEDOR ASFÁLTICO**

**ANEXO 5
MODELO PARA LA ROTULACIÓN DEL CD-ROM O DVD**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
TRABAJO DE GRADO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
2018**



**Juan Cristóbal Neira Carrera
Andrea Fernanda Rengel Coronel**

**EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DINÁMICO DE UNA
MEZCLA DENSA EN CALIENTE CON MÁS DE VEINTE
AÑOS DE USO CON LA APLICACIÓN DE UN
REJUVENECEDOR ASFÁLTICO**