

Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá

ANA SOFÍA FIGUEROA INFANTE¹

ELSA FONSECA SANTANILLA²

RESUMEN

Esta investigación se deriva del proyecto *Movilidad sustentable*, realizado en el Centro de Investigación de Desarrollo Sustentable y Cambio Climático (Cidescac) de la Universidad de La Salle. En la investigación se estudiaron algunos materiales no biodegradables que podrían ser reciclados y reutilizados como sellantes de fisuras en pavimentos asfálticos. Los materiales reciclados fueron caucho proveniente de las llantas usadas de los vehículos y poliestireno (icopor), para mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de la mezcla asfáltica. Los ensayos realizados incluyeron la caracterización fisicoquímica de los materiales para encontrar las proporciones óptimas de aplicación en campo. Se analizaron ensayos para encontrar la estabilidad química, la deformación plástica, la fatiga y el módulo dinámico de la mezcla diseñada. El alcance de esta fase de la investigación es la producción, la colocación y el seguimiento del nuevo material para la reparación de daños superficiales en pavimentos flexibles, para lo cual se realizó un tramo de prueba otorgado por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU).

Palabras clave: pavimento asfáltico reciclado (RAP), sello de fisuras, asfaltos modificados, poliestireno, caucho de llanta,

¹ Candidata a doctora en Ingeniería por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería por la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Magíster en Docencia por la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Especialista en Gerencia de Construcciones por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Especialista en Geotecnia Vial y Pavimentos por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Ingeniera civil por la Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle y lidera el grupo de investigación Indetec en esta misma universidad. Correo electrónico: afigueroa@unisalle.edu.co

² Magíster en Docencia de la Química por la Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia. Especialista en Gestión del Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Química por la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Actualmente es docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de La Salle e investigadora del grupo Indetec en la misma universidad. Correo electrónico: elsafonseca@unisalle.edu.co.

FECHA DE RECEPCIÓN: 10 DE ENERO DEL 2014 • FECHA DE APROBACIÓN: 26 DE OCTUBRE DEL 2014

Cómo citar este artículo: Figueroa Infante, A. S. y Fonseca Santanilla, E. (2015). Estudio de material reciclado para reparar fisuras y su aplicación en un pavimento en Bogotá. *Épsilon*, 24, 89-121.

Study of Recycled Material for Repairing Cracks and its Application on a Pavement in Bogota, Colombia

ABSTRACT

The article stems from the *Sustainable Mobility* project carried out at the Research Center for Sustainable Development and Climate Change (Cidescac) from La Salle University. Some nonbiodegradable materials were studied that could be recycled and reused as fissure sealants in asphalt pavements. The recycled materials were rubber from the used tires of vehicles and polystyrene (styrofoam) to improve the physical, mechanical and chemical properties of the asphalt mix. The tests performed included the physicochemical characterization of materials to find the optimum proportions of field application. Tests were analyzed in order to find chemical stability, plastic deformation, fatigue and the dynamic module of the designed mix. The scope of this phase of the research is the production, placement and follow-up of the new material to repair surface damage in flexible pavement, for which a test stretch granted by the Urban Development Institute was carried out.

Keywords: recycled asphalt pavement (RAP), fissure sealant, modified asphalts, polystyrene, rubber from tires.

Estudo de material reciclado para reparar fissuras e sua aplicação em um pavimento em Bogotá, Colômbia

RESUMO

O artigo se deriva do projeto *Movilidad sustentable*, realizado no *Centro de Investigación de Desarrollo Sustentable e Cambio Climático* (Cidescac) - segundo suas siglas em espanhol - Pesquisa de Desenvolvimento Sustentável e Mudanças Climáticas - da Universidad de La Salle. Estudaram-se alguns materiais não biodegradáveis que poderiam reciclar-se e reutilizar-se como selantes de fissuras em pavimentos asfálticos. Os materiais reciclados foram a borracha proveniente dos pneus usados dos veículos e o poliestireno (isopor), para melhorar as propriedades físicas, mecânicas e químicas da mistura asfáltica. Os ensaios realizados incluíram a caracterização físico-química dos materiais para encontrar as proporções ótimas de aplicação em campo. Analisaram-se ensaios para encontrar a estabilidade química, a deformação plástica, a fadiga e o módulo dinâmico da mistura desenhada. O alcance desta fase da pesquisa é a produção, a colocação e o seguimento do novo material para a reparação de danos superficiais em pavimentos flexíveis, para o qual se realizou um trecho de prova outorgado pelo Instituto de Desenvolvimento Urbano.

Palavras chave: pavimento asfáltico reciclado (RAP), selo de fissuras, asfaltos modificados, poliestireno, borracha de pneu.

Introducción

Colombia en uno de los países con mayor déficit en infraestructura vial en el mundo. Los principales problemas que se presentan en los pavimentos asfálticos en servicio son la baja resistencia a la fatiga y la deformación permanente, que generalmente son consecuencia de una inadecuada dosificación ligante-agregado, sus interacciones, el método de colocación, mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, así como del desempeño de los materiales ante cambios bruscos de temperatura. Los daños evidentes en la red vial nacional y de Bogotá se observan en las figuras 1 y 2, respectivamente.

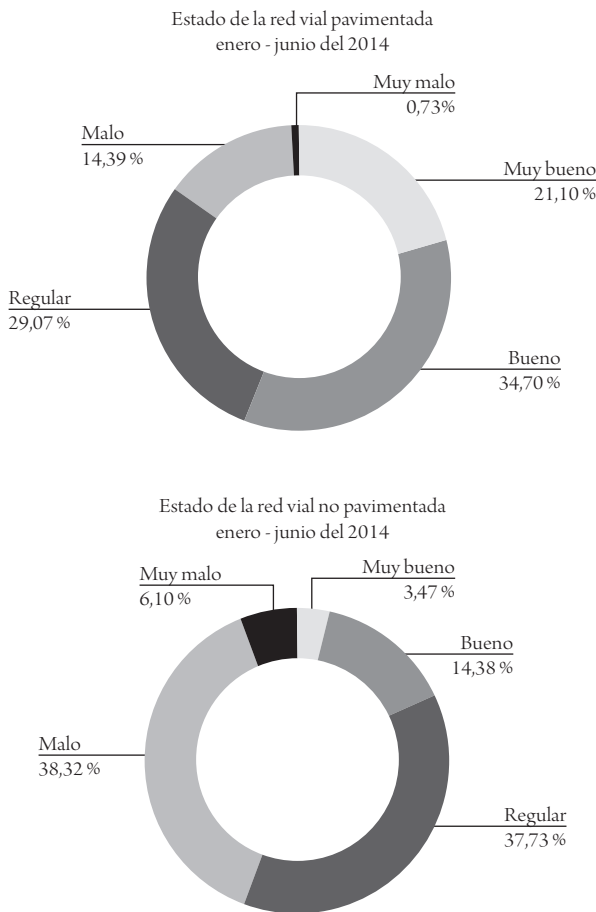


Figura 1. Estado de la red vial nacional

Fuente: Instituto Nacional de Vías (Invias, 2013).

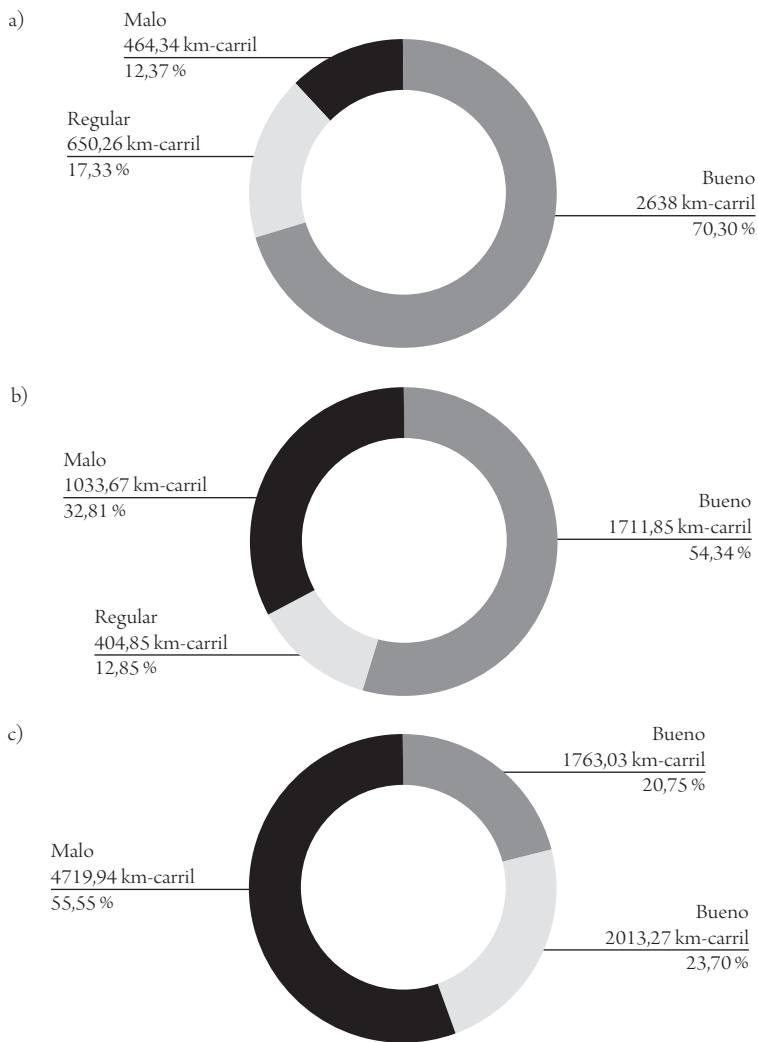


Figura 2. Estado de la malla vial en Bogotá en 2013

Nota: a) malla vial arterial; b) malla vial intermedia; c) malla vial local

Fuente: IDU (2013).

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, con lo cual mejoran el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intentan reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Coinsky *et al.*, 1994).

Los bitúmenes modificados con polímeros (BMP) empleados en pavimentación de carreteras son materiales nuevos que en la actualidad son ampliamente usados en pavimentación de carreteras con tráfico intenso o con temperaturas extremas. En términos generales, los asfaltos modificados con polímeros mejoran propiedades como menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica y mayor resistencia al agua y al envejecimiento.

En este trabajo se investigó acerca de la factibilidad de mejorar el comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica con asfalto proveniente del Complejo Industrial de Barrancabermeja (CIB) cuando se modifica el ligante convencional con dos residuos poliméricos: poliestireno expandido (icopor) y polvo de llantas usadas. A partir de la caracterización fisicoquímica y mecánica, se fabricó una mezcla densa en caliente para rodadura tipo MDC-2 (Norma Inviás-2007), debido a su gran utilización en el país.

Marco teórico

Ligante asfáltico modificado

Los ligantes asfálticos modificados son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, con lo cual mejoran el desempeño del pavimento a largo plazo. Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intentan reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica (Coinsky *et al.*, 1994).

Polvo de llanta. Mejora la flexibilidad y la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, con lo cual disminuye la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Se utiliza en carpetas delgadas de granulometría abierta y en tratamientos superficiales. Entre los cauchos sintéticos utilizados para modificar asfaltos se encuentran los de tipo estireno butadieno, y entre estos, el SBR es el más utilizado. Después de la polimerización, este material contiene entre el 20% y el 23% de estireno. La presencia del butadieno permite el entrecruzamiento con el azufre y hace posible producir el isómero CIS,³ que tiene una mayor elasticidad que la del

3 Son isómeros que difieren de la distribución de átomos en la molécula

caucho natural. El estireno permite tener un caucho más duro y más tenaz, lo que permite que no se cristalice cuando experimenta grandes esfuerzos (figura 12).

Poliestireno. Es un material plástico transparente y relativamente frágil, pero puede ser modificado con caucho, lo que lo hace expansible y resistente al impacto. La presencia de un anillo bencénico en cada átomo de carbono de la cadena principal produce una configuración rígida con suficiente impedimento estérico para hacer el polímero muy inflexible a temperatura ambiente. Se aplica en piezas del interior de automóviles, botones de aparatos y utensilios domésticos (Yip y Dalton, 1971).

En los ligantes modificados con polímeros, a elevadas temperaturas pueden producirse fenómenos de cremado y sedimentación. Ello enriquece el ligante en polímero en la parte superior o inferior del tanque, dependiendo de la densidad del polímero respecto al ligante. Esta desestabilización puede producirse por falta de compatibilidad entre ambos o por dispersión incorrecta del polímero, según el sistema y las condiciones de mezclado.

Uno de los trabajos más antiguos y completos sobre asfaltos modificados con polímeros es el de Collins *et al.* (1991), que demostró la efectividad de los polímeros en la mejora de propiedades del asfalto a altas y bajas temperaturas. Por su parte, Socal *et al.* (2004) estudiaron el efecto de la composición química de las mezclas asfalto-polímero modificadas sobre las propiedades viscoelásticas lineales del asfalto y correlacionaron esas propiedades con la susceptibilidad térmica.

En Colombia, el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU, 2002) realizó una investigación para el empleo del caucho de llantas en pavimentos. En esta se establece la metodología que se debe seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto del CIB y de la refinería de Apiay, para lo cual utilizaron caucho molido.

Reyes y Figueroa (2008) analizaron diferentes tipos de mezclas asfálticas con diferentes gradaciones, modificadas por vía seca y vía húmeda. Tales mezclas tenían modificadores provenientes de desechos no biodegradables aplicados de manera independiente en cada una de ellas. El alcance de esta investigación fue de tipo fisicomecánico.

Finalmente, se reseña el trabajo realizado por Figueroa y Reyes (2005), en el que se elaboraron mezclas asfálticas modificadas por la vía húmeda, empleando asfalto del CIB y un porcentaje de poliestireno (icopor) triturado proveniente de vasos desechables como modificador. Los resultados indicaron que la mezcla asfáltica elaborada con asfalto CIB modificado es más resistente y rígida que la mezcla preparada con asfalto convencional.

Contribución ambiental

En Bogotá se producen cerca de 600 toneladas de basura diarias cuyo destino final son los rellenos sanitarios. En Colombia, según estudios, el 55% de los residuos son orgánicos; 10%, plásticos; 13%, papel y cartón; 7%, vidrio; 3,5%, metales, y 12% otros (textiles, cueros y cerámica) (Segura, 2006). La mayoría de los rellenos no cuentan con un sistema de reciclaje adecuado, plantas de selección o aprovechamiento de estos residuos o selección manual para el sustento y apoyo a las comunidades que pueden vivir del reciclaje. Con esta investigación se quiere llamar la atención sobre la importancia de la organización de basuras y demostrar que es posible aprovecharlas en materiales para carreteras, como de hecho lo hacen otros países en el mundo.

Si nos remontamos a los antecedentes sobre el aprovechamiento de residuos y ahorro energético, se encuentra que el mayor interés internacional lo ha suscitado la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)⁴. En 1980 se presentó un proyecto para la incorporación de residuos plásticos en las mezclas bituminosas, el cual recibió recursos de la Asesoría de Investigación Científica y Técnica, en Francia. Durante el proceso surgieron dos problemas aparentemente insuperables: la forma de incorporación del plástico al asfalto y la elección de un desecho adecuado. El primer problema tenía su origen en la idea de que el plástico solo podía actuar en la mezcla bituminosa como modificador de las propiedades

4 Organismo internacional que tiene como principales objetivos: a) impulsar el mayor crecimiento posible de la economía y el empleo, elevar el nivel de vida en los países miembros en condiciones de estabilidad financiera y contribuir al desarrollo de la economía mundial; b) promover el desarrollo económico de los países miembros y no miembros; c) impulsar la expansión del comercio mundial sobre bases multilaterales y no discriminatorias acordes con las normas internacionales. Sus tres protocolos se firmaron en París el 14 de diciembre de 1960. En la actualidad, el Organismo se integra por 25 países que sustentan su estrategia de crecimiento en modelos de mercado, democracia y libre comercio: Alemania, Australia, Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía, Estados Unidos, Canadá, España, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda y México.

reológicas del asfalto; el segundo radicaba en poder contar con un desecho cuya naturaleza fuese apta para obtener la modificación pretendida y que pudiese disponerse de él en forma y cantidades que garantizaran una mínima viabilidad técnica. Posteriormente se iniciaron diversas investigaciones en el mundo con el ánimo de perfeccionar la respuesta de los materiales con el uso de estos desechos (Reyes y Figueroa, 2008).

La presente investigación presenta una aproximación a lo que puede realizarse con este tipo de desechos no biodegradables.

Materiales y métodos

El asfalto empleado para esta investigación proviene del complejo industrial de Barrancabermeja de Ecopetrol (asfalto CIB), de penetración 80-100, mientras que los modificadores empleados fueron el poliestireno correspondiente a vasos desechables y el polvo de llantas usadas. El programa de ensayos realizado se observa en la figura 3.

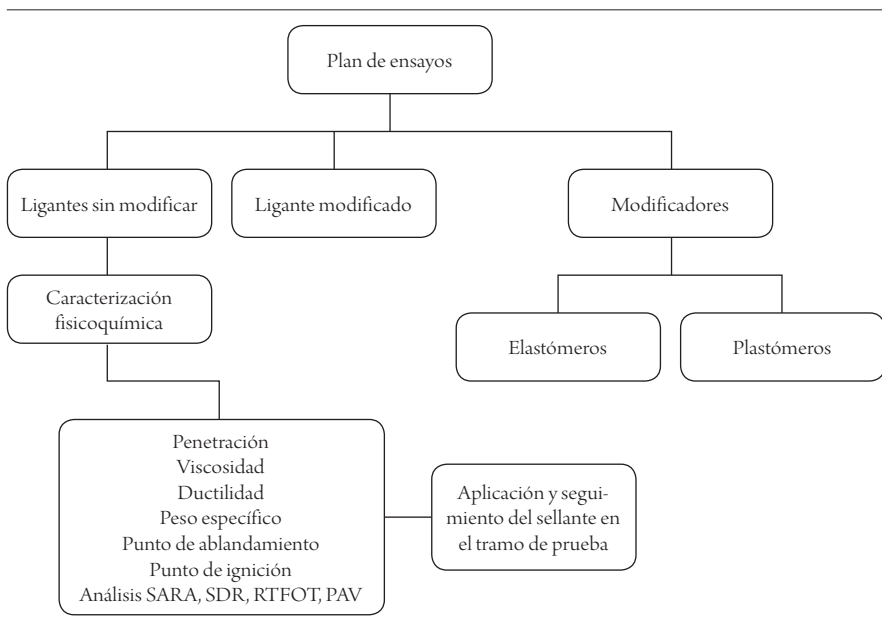


Figura 3. Programa de ensayos realizados en esta investigación

Fuente: elaboración propia.

Los polímeros fueron caracterizados de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas en los Laboratorios de Química de la Universidad de La Salle, en tanto que su análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido SEM se realizó en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido del Centro Interfacultades de la Universidad Nacional de Colombia. El equipo empleado para el análisis fue el microscopio de barrido FEI QUANTA 200, a un voltaje de 30 kV, en modo de operación alto vacío (3×10^{-6} torr).

El asfalto fue modificado mecánicamente empleando el dispersor de asfaltos del Laboratorio de Pavimentos de la Universidad de La Salle. De acuerdo con las condiciones establecidas en ensayos preliminares y trabajos anteriores (Figuroa *et al.*, 2007; Ocampo *et al.*, 2002), se planteó un diseño experimental para establecer el porcentaje óptimo de polvo de llanta para las condiciones de modificación anteriormente establecidas.

Los niveles estudiados para la variable porcentaje de llanta fueron: 0%, 12%, 14%, 16%, 18% y 20%, y en vez de una sola variable respuesta, se estandarizaron las condiciones experimentales que produjeron el asfalto modificado con mejor desempeño de acuerdo con la compatibilidad y estabilidad asfalto-polímero, así como según sus características fisicoquímicas y morfológicas.

Cada mezcla asfalto-polímero preparada fue sometida a la prueba de estabilidad al almacenamiento y la temperatura descrita en US Pat. 5.348.994, en un equipo construido para la investigación, el cual cumple con las especificaciones establecidas en The Shell Bitumen Handbook (2004) (figura 4).



Equipo dispersor de asfaltos Universidad de La Salle



Proceso de modificación de asfalto 80-100

Figura 4. Dispersor de asfalto, Laboratorio de Asfalto de Pavimentos de la Universidad de La Salle

Fuente: elaboración propia.

Caracterización física del asfalto convencional y modificado

El asfalto CIB, de penetración 80-100 original, y las mezclas modificadas preparadas de acuerdo con el apartado anterior fueron caracterizados fisicoquímica y reológicamente. El análisis fisicoquímico de las muestras de asfalto convencional y modificado se realizó de acuerdo con las normas vigentes del Instituto Nacional de Vías (Invías, 2007) e incluyó las siguientes pruebas: ductilidad, penetración, peso específico, punto de ignición y llama, viscosidad rotacional, punto de ablandamiento y pérdida de masa en película delgada.

Los ensayos que se explican de aquí en adelante solo fueron realizados en el asfalto convencional y en el asfalto modificado, que presentó los mejores resultados en los ensayos anteriores. La tabla 1 presenta los resultados físicos realizados a los asfaltos.

Tabla 1. Resultados del análisis físico del asfalto sin modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

ENSAYO	UNIDAD	NORMA	ASFALTO NORMAL				ASFALTO MODIFICADO			
			Mín.	Máx.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO	Mín.	Máx.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	INV-E-702	100	--	140	140	15	-	42.9	35
Penetración (25 °C, 100 g Ss)	0,1 mm	INV-E-706	80	100	90	31	55	70	60	47
Gravedad específica	g/cm ³	INV-E-707	--	--	1,0083	N.A.	-	-	1.0262	N.A.
Punto de ignición	°C	INV-E-709	230	--	306	N.A.	230	-	299	N.A.
Punto de llama	°C	INV-E-709	--	--	348	N.A.	-	-	349	N.A.
Punto de ablandamiento	°C	INV-E-712	--	--	46	48,5	58	-	55	55
Índice de penetración	--	INV-E-724	-1	+1	-0,7907	-2,5159	-1	+1	0,4394	-0,0648
Viscosidad de Brookfield (80 °C)	cP	INV-E-717	--	--	21642	36902	-	-	147333	147125

ENSAYO	UNIDAD	NORMA	ASFALTO NORMAL				ASFALTO MODIFICADO			
			MÍN.	MÁX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO	MÍN.	MÁX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO
Viscosidad de Brookfield (135 °C)	c P	INV-E-717	--	--	418,8	583,3	-	-	3106	2533,9
Viscosidad de Brookfield (180 °C)	c P	INV-E-717	--	--	75	86,9	-	-	521	426,5
Pérdida de masa	%	INV-E-720	--	1	0,431	-	1	-0,511		
Recuperación elástica	%	INV-E-742	--	--	N.A.	N.A.	-	-	61,17	59
Penetración al residuo (% de la original)	%	INV-E-706	48	--	34	65	-	78		
Incremento del punto ablandamiento al residuo	°C	INV-E-712	--	5	2,5	-	-	0		

Fuente: elaboración propia.

Caracterización química del ligante original y modificado

El procedimiento que describe la norma D4124-09 indica que el asfalto analizado mediante solventes se puede separar en cuatro fracciones claramente diferenciables. Una fracción en estado sólido que se identifica como asfaltenos —los cuales aportan la rigidez y dureza al ligante— es la fracción más pesada. Las siguientes tres fracciones se encuentran en estado líquido en el siguiente orden: primero se destilan los hidrocarburos saturados utilizando el heptano y el tolueno; esta solución posee un color casi translúcido. Inmediatamente después se destilan los hidrocarburos aromáticos, los cuales reaccionan a la presencia de tolueno y metanol y cuyo color es amarillento. Por último, se destilan las resinas en presencia de tricloroetileno y su color es café (figura 5).



Figura 5. Separación del asfalto en sus cuatro fracciones: saturados, aromáticos, resinas, asfáltenos (SARA)

Fuente: elaboración propia.

El análisis de las cuatro fracciones o análisis SARA se realizó por duplicado en cada una de las muestras definidas en la tabla 2.

Tabla 2. Nomenclatura de las muestras durante la investigación

MUESTRA	SÍMBOLO
Asfalto original sin modificar y sin envejecer	ASF 80-100 SM-SE
Asfalto original sin modificar y envejecido	ASF 80-100 SM-E
Asfalto modificado sin envejecer	ASF 80-100 M-SE
Asfalto modificado envejecido	ASF 80-100 M-E

Fuente: elaboración propia.

El cálculo del índice de inestabilidad coloidal (IC) se determinó mediante la utilización de la ecuación [1], en tanto el índice de solubilidad (IS) se determinó mediante la ecuación [2]. El valor de IS indica la estructura coloidal de la siguiente manera:

- $IS < 4$ = estructura GEL
- $4 < IS < 9$ = estructura SOL-GEL
- $IS > 9$ = estructura SOL

$$IC = \frac{\text{Constituyentes floculados}}{\text{Constituyentes dispersos}} = \frac{\text{Saturados} + \text{asfaltenos}}{\text{Aromáticos} + \text{resinas}} \quad [1]$$

$$IS = \frac{\text{Resinas}}{\text{Asfaltenos}} + \frac{\text{aromáticos}}{\text{saturados}} \quad [2]$$

Si un asfalto es tipo GEL, posee una baja susceptibilidad térmica y un mayor intervalo de temperatura entre el cambio del estado elástico al estado viscoso. Además, se caracteriza por tener una deformación elástica retardada y por presentar bajas deformaciones permanentes debidas a la carga y la temperatura. Si el asfalto se comporta como un tipo SOL, significa que el asfalto posee una alta susceptibilidad térmica, debido al bajo porcentaje de asfaltenos (que proporcionan dureza y rigidez). Esta condición ocasiona deformaciones permanentes (ahuellamiento) en la mezcla asfáltica. Por su parte, si el asfalto es de tipo SOL-GEL, se caracteriza por su comportamiento elástico y una susceptibilidad térmica intermedia. En la tabla 3 se observan los resultados obtenidos para la separación de fracciones de cada asfalto.

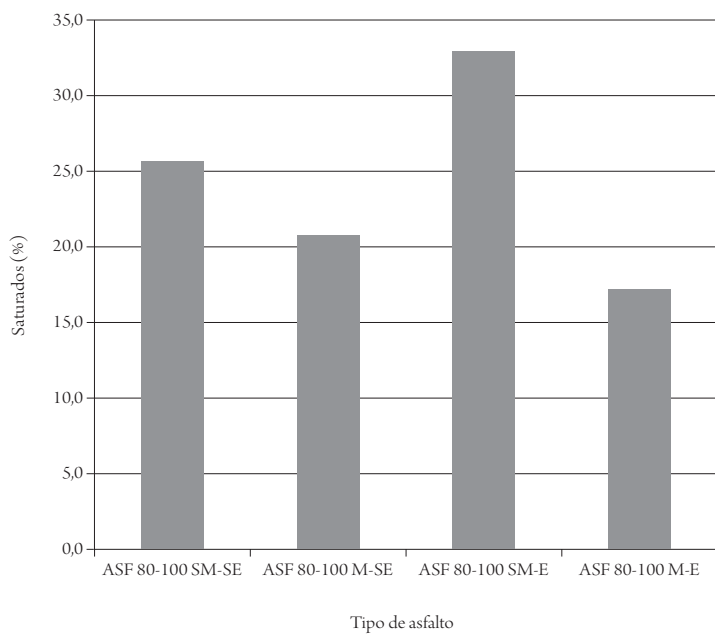
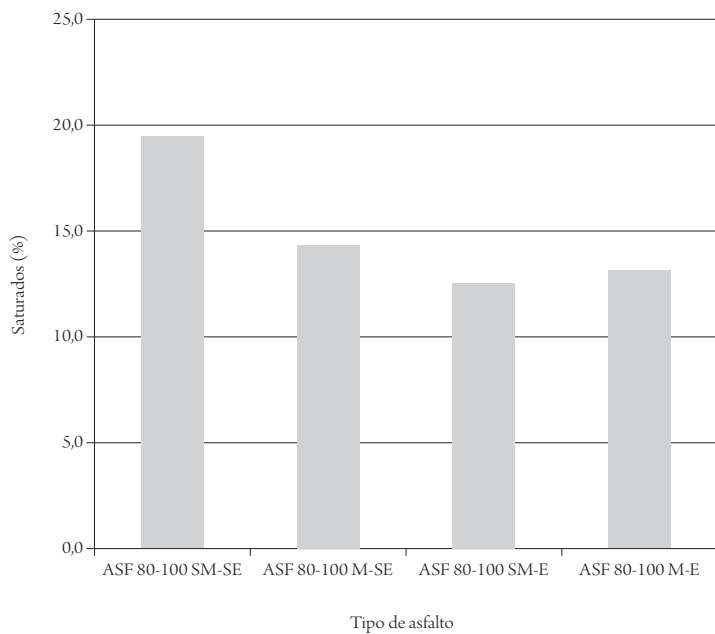
En estos resultados se observa que el asfalto sin modificar tuvo una respuesta tipo SOL-GEL, en tanto que asfalto modificado sin envejecer y envejecido tuvo una respuesta tipo GEL. Adicionalmente, a partir de estos resultados se identifica que el asfalto modificado sin envejecer y envejecido presenta una mayor cantidad de porcentaje de resinas y una disminución en el porcentaje de aromáticos y saturados. Esto significa que el asfalto presenta más rigidez y soporta mayores temperaturas de mezclado y compactación, por ser los asfaltenos y las resinas los que le aportan al asfalto la estabilidad y el soporte dentro de la mezcla. En la figura 6 se observa el resultado gráfico de las fracciones de los asfaltos ensayados.

Tabla 3. Resultados del análisis SARA en asfalto sin modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

TIPO DE ASEALTO	N° DE MUESTRA (%)	ESTADÍSTICA MALTENOS															
		SATURADOS				AROMÁTICOS				RESINAS				ESTADÍSTICA ASEALTENOS			
		VALOR MEDIO (%)	DV (%)	COVARIANZA (%)	VALOR MEDIO (%)	DV (%)	COVARIANZA (%)	VALOR MEDIO (%)	DV (%)	COVARIANZA (%)	VALOR MEDIO (%)	DV (%)	COVARIANZA (%)	VALOR MEDIO (%)	DV (%)	COVARIANZA (%)	
ASF 80-100	1	19,43	0,04	0,18	25,24	0,05	0,20	42,34	0,02	0,05	13,01	0,06	0,49	0,48	4,55		
SM-SE																	
ASF 80-100	2	14,38	0,23	1,62	20,41	0,78	3,85	43,72	1,73	3,95	21,50	0,71	3,29	0,56	3,45		
SM-SE																	
ASF 80-100	1	12,57	0,97	7,71	32,61	3,34	10,26	33,72	3,56	10,55	21,12	0,76	3,58	0,51	4,19		
SM-E																	
ASF 80-100	2	13,20	0,90	6,81	16,99	1,28	7,54	46,05	0,54	1,17	23,77	0,92	3,87	0,59	3,22		
SM-E																	

DE: desviación estándar.

Fuente: elaboración propia.



Continúa figura 6

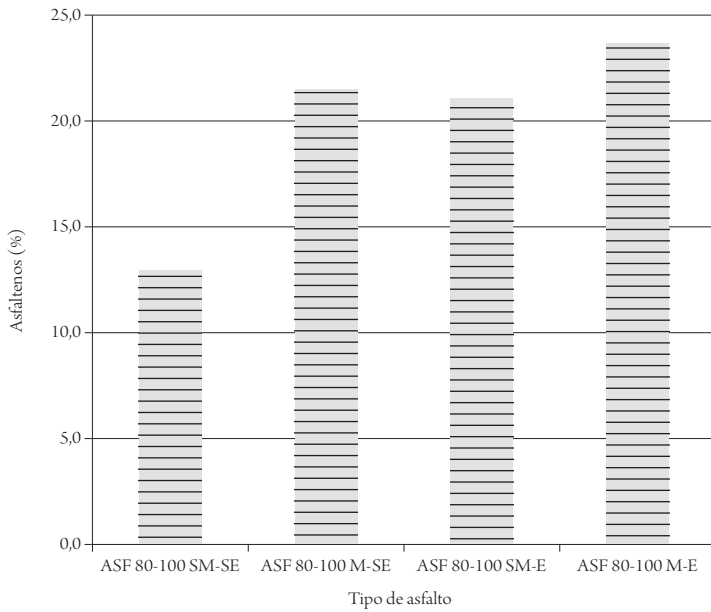
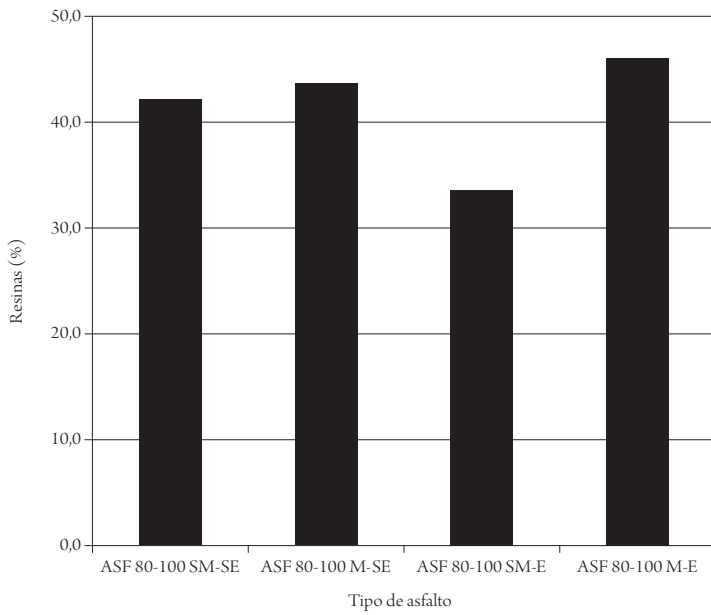


Figura 6. Resultado gráfico de las fracciones SARA para todos los tipos de asfalto ensayados

Fuente: elaboración propia.

Otro ensayo realizado al ligante modificado fue el de la *fracción de resinas*, para la cual el asfalto CIB original presentó bandas débiles en 750 cm^{-1} (vibración de deformación fuera del plano del grupo metilo de cuatro enlaces C-H aromáticos), 1605 cm^{-1} (bandas de estiramiento de carbonos aromáticos), 1705 cm^{-1} (bandas de estiramiento de grupos carbonilo o carboxilo), 2852 cm^{-1} y 2923 cm^{-1} (bandas de vibración de estiramiento de enlaces C-H) y finalmente una banda de intensidad media alrededor de 1465 cm^{-1} , correspondiente a vibraciones de deformación de grupos metilo y metileno.

El asfalto modificado presenta bandas ausentes o de mayor intensidad que la fracción correspondiente al asfalto convencional en 750 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} a 1200 cm^{-1} (funciones oxigenadas), 1305 cm^{-1} y 1605 cm^{-1} , que se explican por razones similares a las expuestas anteriormente. En la figura 7 se presentan las fotografías obtenidas para las muestras de asfalto desoleizadas por microscopía electrónica de barrido (SEM) de alto vacío, tanto para el asfalto CIB convencional como para el modificado.

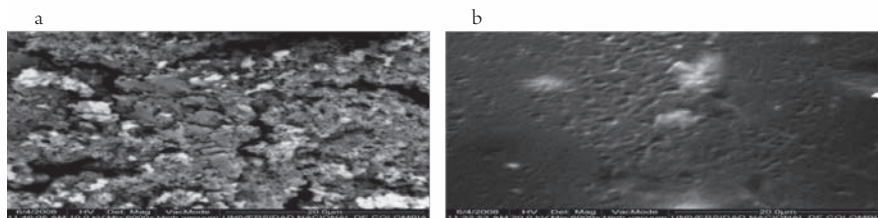


Figura 7. Análisis SEM del asfalto CIB convencional (6000X) (a) y análisis SEM de asfalto CIB modificado (6000X) (b)

Fuente: elaboración propia.

En la figura 7 se puede ver la influencia de los polímeros sobre las características morfológicas del asfalto. En la figura 7a correspondiente al asfalto CIB original, se puede ver el aspecto arenoso de la muestra; mientras que en la figura 7b la homogeneidad del bitumen resultante es evidente, lo que permite suponer una buena compatibilidad entre el asfalto y el polímero y, por lo tanto, mayor estabilidad de este ligante frente al almacenamiento y a las temperaturas elevadas.

Curva de viscosidad de Brookfield

Para tener un indicativo del cambio de viscosidad con la variación de la temperatura, aquella se midió a partir del ensayo en el viscosímetro de Brookfield (figura 8).

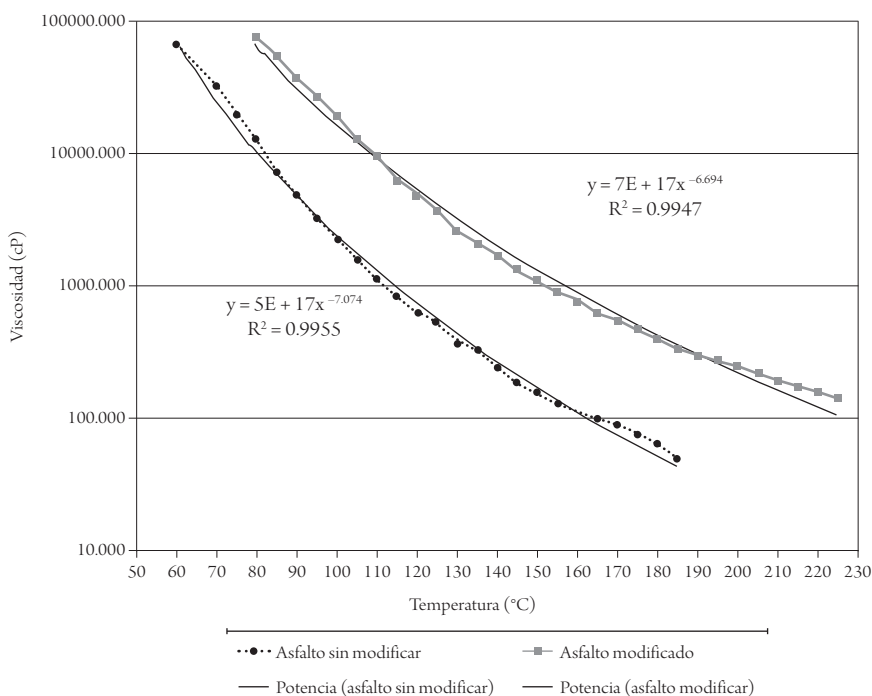


Figura 8. Comparación de curva reológica entre el asfalto sin modificar y el modificado, sin envejecer

Fuente: elaboración propia.

Proceso de envejecimiento primario en horno rotatorio de película delgada

Luego de haber realizado la caracterización física del ligante normal y modificado sin envejecer, se procedió a realizar el proceso de envejecimiento a partir de un horno rotatorio de película delgada (RTFO), como se muestra en la figura 9. Este método se utiliza para llevar el ligante asfáltico a una condición igual o cercana a la que tendrían al entrar en servicio (figuras 10 y 11).



Botellas girando a temperatura 163°C, durante 85 min. Asfalto sin modificar



Botellas después del envejecimiento, y botellas I y II para cálculo de pérdida de masa. Asfalto sin modificar



Botellas con muestra de asfalto modificado, antes de la prueba. Botella I y II. Para pérdida de masa.

Figura 9. Prueba envejecimiento primario en horno rotatorio de película delgada

Fuente: elaboración propia.

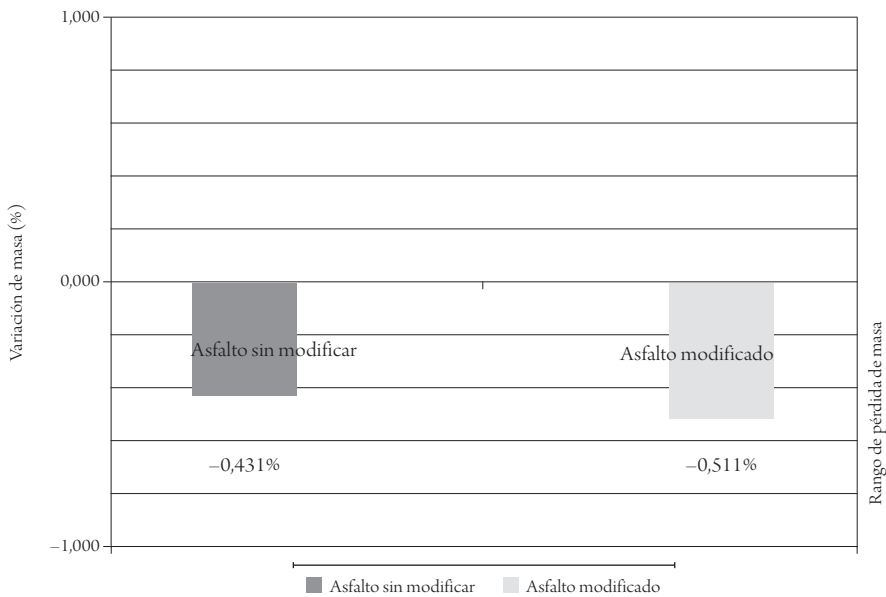


Figura 10. Variación de masa después del horno rotatorio de película delgada

Fuente: elaboración propia.

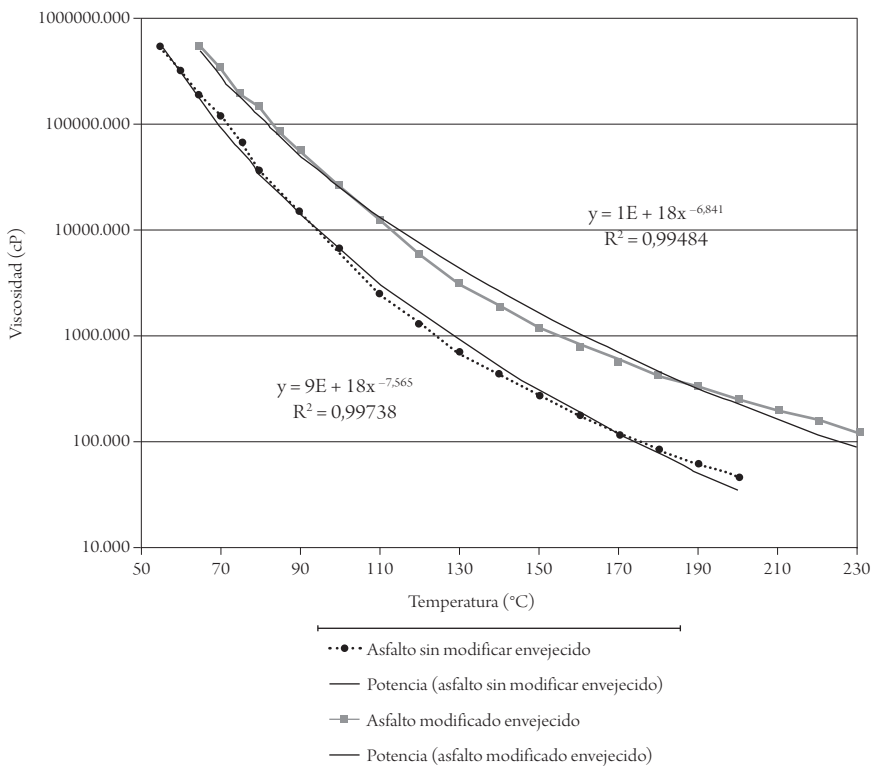


Figura 11. Comparación de curva reológica entre el asfalto sin modificar y el modificado, envejecido

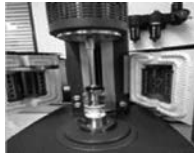
Fuente: elaboración propia.

Reología con reómetro de corte DSR

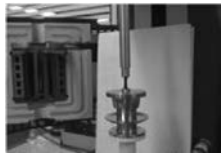
El análisis reológico se determinó mediante la utilización del reómetro de corte dinámico (DSR) de la Pontificia Universidad Javeriana (figura 12), a partir del procedimiento descrito en la norma INVE-750-07, cuya norma homóloga AAS-HTO es la T 315-05. Su funcionamiento radica en la aplicación de un patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra previamente definida (1 mm de espesor y 25 mm de diámetro, o 2 mm de espesor y 8 mm de diámetro). Se toman los resultados de la respuesta al aplicar el corte (deformación), la muestra se mantiene a la temperatura del ensayo mediante el calentamiento ya sea de los platos tanto inferior como superior o mediante la utilización de una cámara de ambiente protegido.



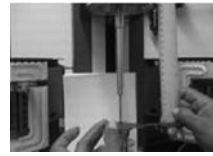
Equipo DSR-ULS



Equipo DSR y cámara ETC



Muestra de 8 mm de diámetro asfalto modificado



Muestra de 8 mm de diámetro asfalto modificado

Figura 12. Reómetro de corte directo (DSR)

Fuente: elaboración propia.

Los patrones analizados determinan dos importantes parámetros, entre muchos otros:

- *Módulo de Corte Dinámico* [G^*]: se considera un indicador de rigidez o resistencia del ligante asfáltico a la deformación debida al esfuerzo de corte aplicado a la muestra.
- *Ángulo de fase* δ : es el indicador de las deformaciones elásticas (recuperables) y viscosas (no recuperables) del asfalto.

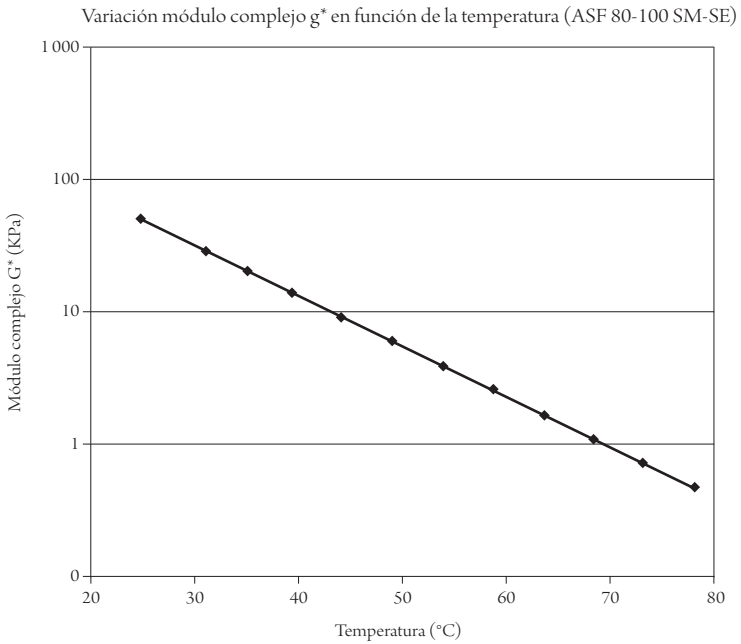
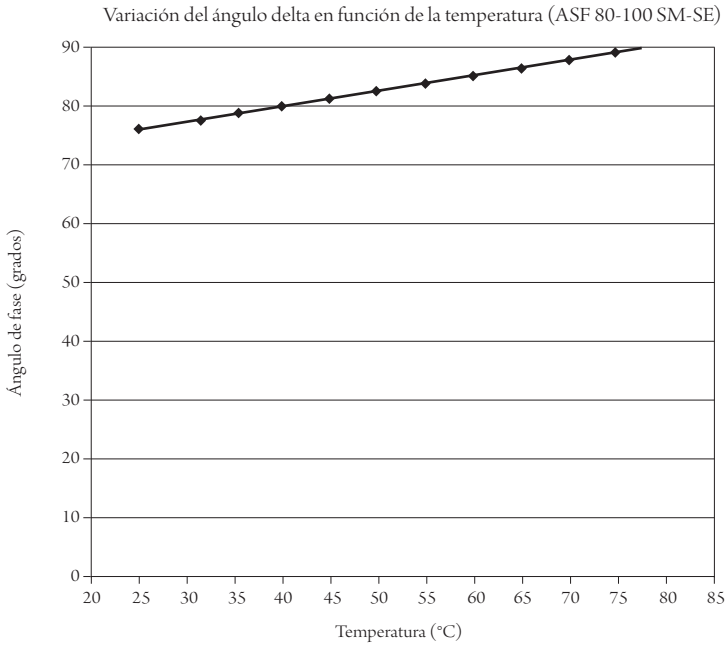
Con estos dos parámetros se puede determinar la resistencia de corte de un ligante asfáltico, además de otras propiedades que están directamente relacionadas con estos parámetros (tabla 4 y figura 9).

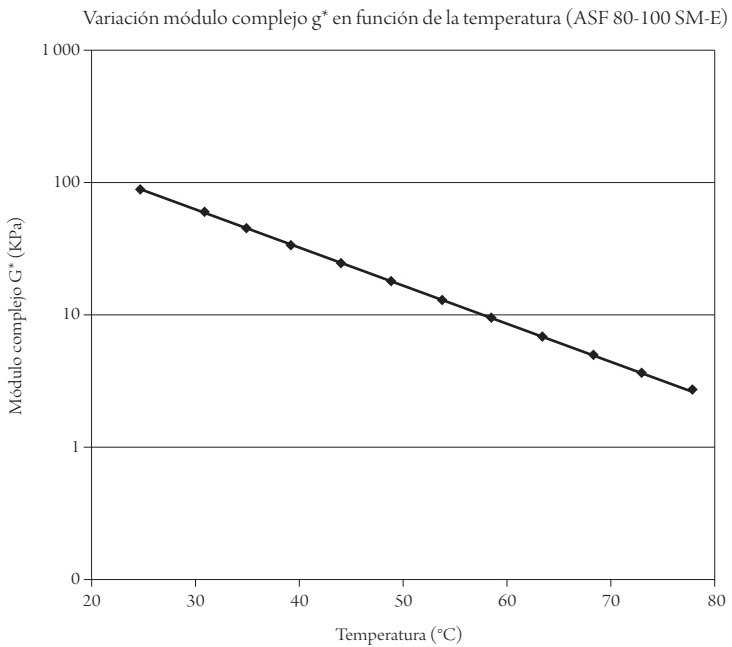
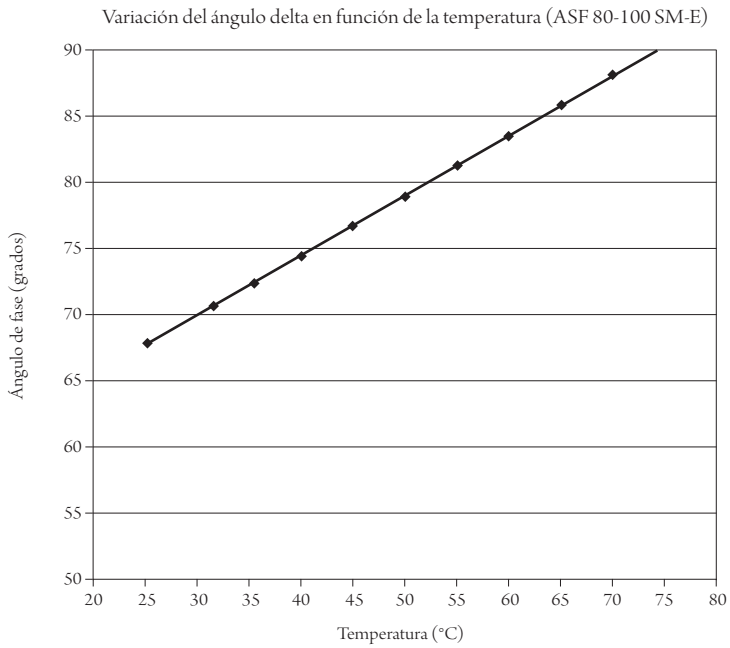
Tabla 4. Control de ahuellamiento en el DSR

FÓRMULA	TIPO DE ASFALTO
$[G^*]/\text{sen}(\delta) > 1 \text{ kPa}$	Asfalto original
$[G^*]/\text{sen}(\delta) > 2,2 \text{ kPa}$	Asfalto envejecido RTFO

De estos resultados se observa que para el caso del asfalto modificado y sin modificar, a medida que la temperatura aumenta, el ángulo δ también lo hace; sin embargo, al comparar el asfalto modificado con el asfalto sin modificar, se tiene que para este último la susceptibilidad al ahuellamiento es mayor. Esto indica que con el asfalto modificado se podrían reducir las posibles deformaciones plásticas que se presenten en la mezcla asfáltica. El módulo complejo del asfalto modificado sin envejecer respecto al del asfalto sin modificar y sin envejecer es más alto. Este último aspecto es conveniente por cuanto al aumentar el módulo, la mezcla

seguramente tendrá una mejor respuesta a las cargas impuestas por el tráfico con bajas deformaciones (figura 13).





Continúa figura 13

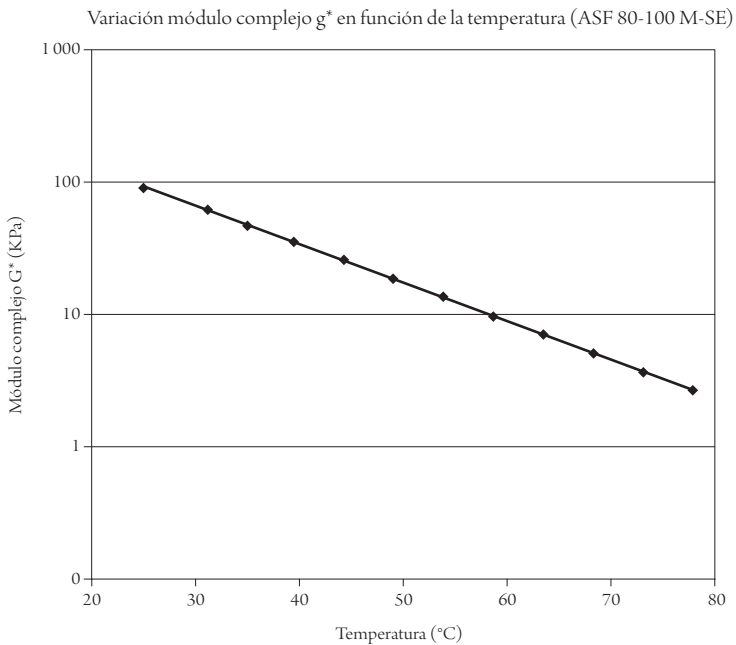
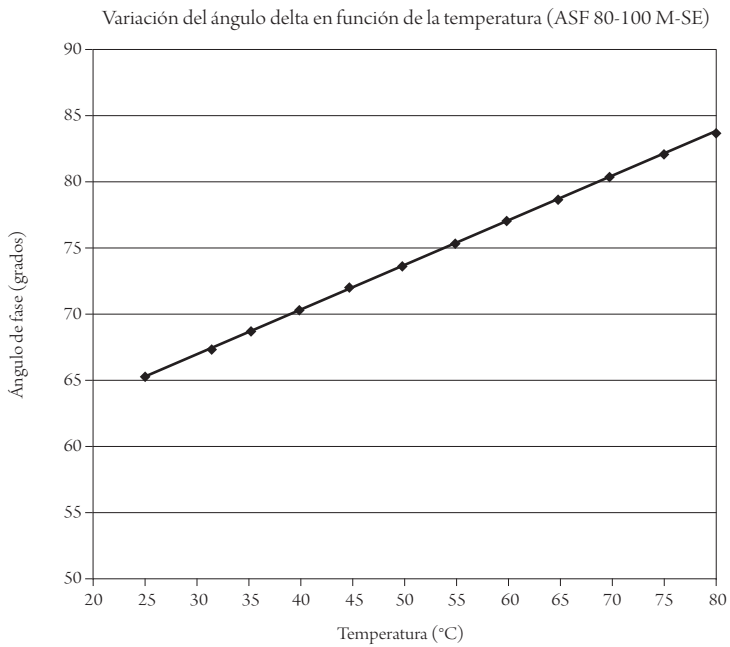


Figura 13. Variación del módulo complejo $[G^*]$ y del ángulo δ con la temperatura en el ensayo con el reómetro de corte directo

Fuente: elaboración propia.

Tramo de prueba

El tramo de prueba escogido está localizado en Bogotá, la capital de Colombia. La ciudad está ubicada en la meseta de la cordillera Oriental de los Andes, a 2630 msnm. Limita al occidente con el río Bogotá, al sur con las estribaciones del páramo de Sumapaz y al norte con los terrenos agrícolas de la sabana. La ciudad tiene actualmente una población de 6.840.116 habitantes, 7.945.263 en el área metropolitana, con una densidad poblacional de aproximadamente 3912 habitantes por kilómetro cuadrado. La ciudad tiene un clima de montaña debido a la altitud (principalmente afectado por la nubosidad) que oscila entre los 7 y los 18 °C, con una temperatura media anual de 14°C (similar al clima de la primavera septentrional). Las temporadas más lluviosas del año son entre abril y mayo, y entre septiembre y noviembre, cuando se alcanzan 114 mm/mes.

El tramo que estableció el IDU, después de los trámites pertinentes para la elaboración de la investigación, fue la calle 152, entre autopista norte hasta la carrera 54.

Fase I: análisis de la información existente. En esta fase se recopiló toda la información existente referente a los recuperadores de pavimentos existentes, sus alcances y limitaciones. Además, se realizaron seguimientos a proyectos que se estén llevando a cabo en la actualidad en la ciudad.

Fase II: selección del tramo de prueba. En esta fase se realizaron los trámites necesarios ante el IDU para la adjudicación del tramo, y se elaboró el plan de manejo de tráfico, el cual fue radicado ante la Secretaría de Movilidad Distrital, entidad que autorizó para iniciar labores de trabajo sobre el tramo adjudicado por el IDU.

Fase III: análisis del deterioro actual del pavimento. En esta fase se determinaron las condiciones actuales en las que se encontraba la estructura de pavimento flexible. Para esto se realizó un trabajo de campo a partir del cual se estableció el tipo de falla de la estructura, se determinó el tránsito actual al que está sometido el tramo y se establecieron las soluciones para mitigar el deterioro encontrado en la estructura del pavimento.

Fase IV: colocación del biosello SOEL. En esta fase se realizó la aplicación del sellante sobre un sector de 50 m de longitud, el cual fue escogido a partir de la evaluación de la totalidad del tramo de 280 m de longitud.

Fase V: Seguimiento del tramo a corto y mediano plazo. En esta fase se evaluó el desempeño del sellante a corto y mediano plazo después de aplicado (figura 14).

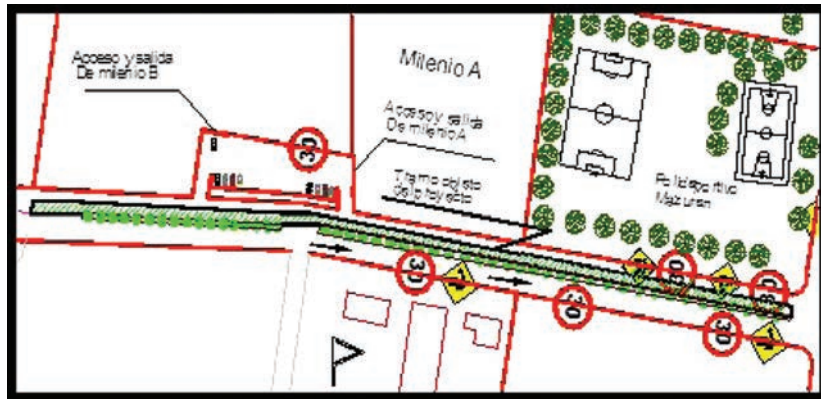


Figura 14. Localización del tramo objeto de estudio

Fuente: autoras.

La determinación de la condición superficial del pavimento se basó en la metodología Paver referenciada anteriormente. Los cálculos de las siguientes tablas se realizaron a partir de lo siguiente:

$$MDR=100-\sqrt{((\sum[Pni])^2)}$$

Donde Pni^2 es el peso de ponderación del daño según su severidad y extensión. Este número se determina a partir de curvas establecidas en el método Paver (anexo 1). A partir de esto se determina el OPI de la siguiente forma:

$$OPI = MDR * (([Se])^{((0.198-0.264IRI))} / 5)^{0.12}$$

Donde MDR es el índice de fallas superficiales e IRI es el índice de rugosidad internacional (m/Km) (figura 15).

Discusión y conclusiones

Se estableció que el poliestireno expandido como polímero mantiene y mejora las propiedades elásticas del ligante, mientras que la llanta mejora propiedades como

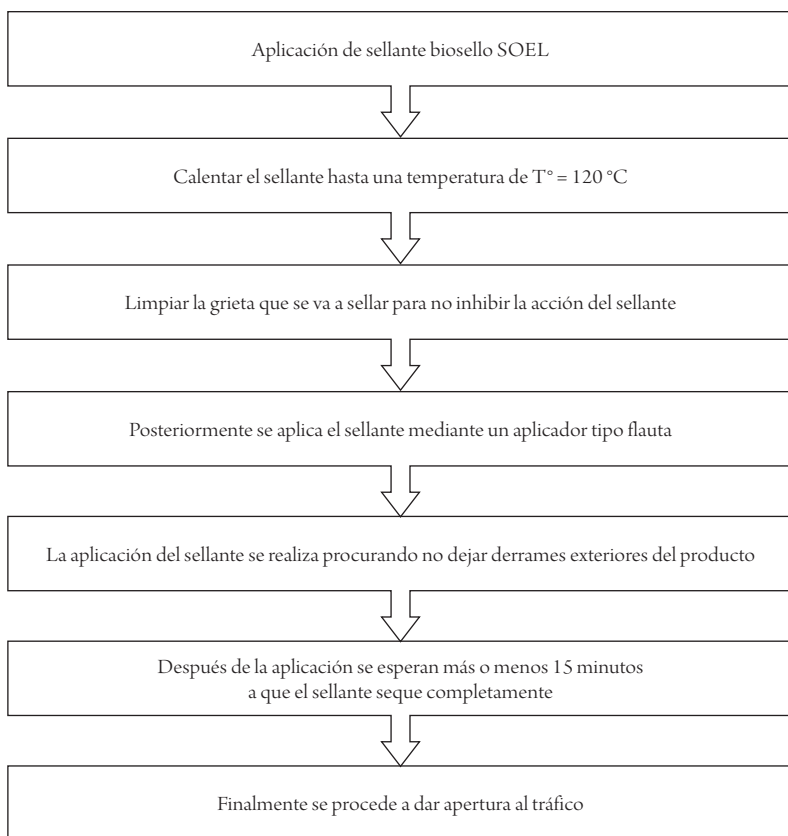


Figura 15. Diagrama sobre la aplicación del sello y seguimiento de las reparaciones con el Biosello SOEL

Fuente: elaboración propia.

la susceptibilidad térmica, la resistencia a la fatiga, la inflamabilidad y la resistencia a los solventes. De acuerdo con los resultados de la investigación, se encontraron los porcentajes óptimos de cada polímero para la modificación del asfalto CIB convencional, y esta dosificación generó un ligante modificado estable (respecto de las interacciones ligante-polímero) que, además de contener un porcentaje importante de llanta usada, contribuye a la solución de un grave problema ambiental.

Los resultados indicaron que no se verificó un cambio significativo en la estructura química del ligante, y allí el asfalto CIB modificado es una mezcla física de asfalto-polímero estable y homogénea. Las curvas reológicas y las energías de activación

de flujo calculadas permiten predecir una menor susceptibilidad térmica del asfalto CIB modificado respecto del asfalto CIB convencional.

Finalmente, una de las pretensiones de mayor relevancia es aportar con nuestros resultados información para que se implemente por norma en el país el uso de estos desechos no biodegradables como el polvo de llanta y otros en las mezclas asfálticas para pavimentos. El módulo complejo del ligante modificado es mayor respecto al módulo complejo del ligante sin modificar, en el rango de temperaturas estudiadas, es decir, de 25 °C a 80 °C. Se recomienda analizar puntos en intervalos de bajas temperaturas (negativas) a altas temperaturas (por encima de la de mezclado) y estudiar con mayor repetitividad los resultados obtenidos para el módulo dinámico del ligante modificado envejecido.

Si se planea seguir trabajando sobre el tramo, es importante recordar que se debe presentar el plan de manejo de tráfico con conteos actualizados. Además, es necesario mencionar que durante los trabajos que se realizaron se instalaron tres semáforos en la zona, los cuales deben ser tenidos en cuenta al momento de la realización del PMT, ya que muy posiblemente la entidad encargada de la movilidad exija un estudio de colas en estos semáforos.

Para caracterizar un poco mejor el comportamiento del sellante, se recomienda aplicarlo en zonas de tierra caliente, por cuanto al parecer el sellante presenta debilidades con gradientes de temperatura de altos, lo que sería bueno caracterizar para un posible mejoramiento en el laboratorio del biosello SOEL.

Para establecer la vida útil del sellante, se recomienda seguir realizando visitas periódicamente; sin embargo, vale recordar que para cualquier cerramiento de la vía se debe contar con un permiso de la Secretaría de Movilidad, puesto que cualquier agente de tránsito lo puede exigir, y en caso de no tenerlo puede acarrear multas para el encargado del proyecto.

Debido al problema que presenta el sellante al no rigidizarse, se se recomienda incluir un aditivo en la preparación del sellante que lo vuelva rígido, para que no presente este tipo de desventajas frente a otros. El IRI topográfico promedio del tramo es de 0,49375 m/km, lo que, en consonancia con el IDU, refiere un nivel de servicio bueno de la vía, por tener un IRI entre 0 y 4 m/km. Sin embargo, es necesario hacer mediciones con equipos especializados para tener mayor precisión sobre este valor.

Referencias

- Agnusdei, J.A. (1997). *Asfaltos modificados y sus aplicaciones*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Amaya, C. y Prieto, M. (2008). *Comparación de los resultados de la modificación de asfalto con poliestireno y llanta triturada, obtenidos de procesos de mezcla manual y de mezcla con el dispersor de asfaltos* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Ander, P. y Sonnessa, Anthony. (1996). Macromoléculas. En *Principios de química: introducción a los conceptos teóricos*. México: Limusa.
- Arenas, H. (2004, 18-20 de agosto). La modificación de los asfaltos colombianos: una respuesta al deterioro prematuro de los asfaltos. *IV Jornadas Internacionales del Asfalto*. Cartagena.
- Arenas, H. (2005). *Tecnología del cemento asfáltico* (4.^a ed.). Bogotá: FAID.
- Asphalt Institute (1994). *Background of superpave asphalt binder test methods*. Lexington: Federal Highway Administration.
- Botasso, G., Gonzalez, O., Rosato, M., Rebollo, O. y Rivera, J. (2000). *Asfalto modificados fijación de residuos contaminantes*. Buenos Aires: Universidad Tecnológica Nacional.
- Coinsky, R., Huber, G., Anderson, M., Kennedy, T. y Solaiman, M. (1994). The Superpave mix design manual for new construction. *Strategic Highway Research Program SHRP-A-407, 1994. chapters 1 and 2*.
- Collins, J. et al. (1991). Improved performance of paving asphalts by polymer modification. *Journal of the Association of Asphalt paving technologists (AAPT)*, 60, 43-79.
- Cuéllar, A. (2003). *Estudio comparativo de las leyes de fatiga de una mezcla cerrada 0/10, con y sin adiciones de icopor* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Cubillos Estrella, C. A. (2011). *Evaluación del asfalto 80-100 producido en Barrancabermeja modificado con elastómeros, plastómeros y polímeros no biodegradables utilizando el dispersor de asfaltos de la Universidad de La Salle* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Estrada, J. y González, A. (2002). *Mejoramiento de las mezclas asfálticas drenantes utilizando como ligante el asfalto-caucho* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Figuroa, A., Reyes, F., Hernández, D., Jiménez, C. y Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Revista Ingeniería e Investigación*, 27, 5-15.
- Figuroa, A. y Reyes, F. (2005). *Asfalto modificados con poliestireno* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.

- Figuroa, A., Fonseca, E. y Reyes, F. (2009). Caracterización fisicoquímica y morfológica de asfaltos modificados con material reciclado. *Ingeniería y Universidad*, 13(1), 45-70.
- Figuroa, A. y Fonseca, E. (2010). *Asfalto modificado con poliestireno y polvo de llanta* (informe de trabajo de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Hernández, G. (2007). *Mejoramiento de las propiedades termo-mecánicas de asfalto modificado con copolímeros de estireno-butadieno*. México: CONINFRA.
- Heshmat, A. (1995). *Polymer modifiers for improved performance of asphalt mixture*. Texas: Texas Transportation Institute.
- Instituto Nacional de Vías (Invias) (2007). *Normas de ensayo de materiales para carreteras*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). (2002). *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas*. Bogotá: Autor.
- Ocampo, M., Caicedo, B. y González, D. (2002). *Experiencia colombiana sobre el empleo de grano de caucho reciclado proveniente de llantas usadas*. Ponencia presentada en Terceras Jornadas Internacionales del Asfalto. Agosto 21-23 de 2002, Universidad del Cauca, Popayán.
- Reyes, F. y Figuroa, A. (2008). *Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas: síntesis de la investigación colombiana*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Rodríguez Suparez, H. R. (2010). *Restauración y recuperación de pavimentos mediante emulsiones a base de látex* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Sánchez, A. (2006). *Análisis comparativo de las características físicas entre el asfalto convencional y el asfalto modificado con poliestireno y llanta triturada* (tesis de grado). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Socal, L. et al. (2004). Study of rheological properties of pure and polymer-modified brazilian asphalt binders. *Journal of Materials Science*, 39(2), 539-546.
- Segura Loaiza, L. H. (2006). *Las basuras y el reciclaje*. Bogotá: Contraloría de Cundinamarca.

Anexos: fichas de colocación y seguimiento

REGISTRO DE FISURAS POR SELLAR

Fecha: 19 de diciembre del 2009

Ficha de inventario #: 1

Sitio de aplicación:

De: K0 + 40 m

Hasta: K0 + 50 m

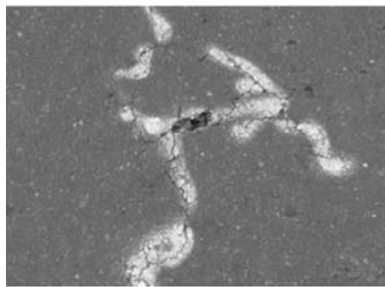
1. **Tipo de daño:** grieta longitudinal

2. **Descripción del daño:** Fisura aproximadamente longitudinal, paralela al eje de la carretera, con abertura mayor a 3 mm.

Foto 1. Ubicación general de la falla



Foto 2. Detalle de la falla por sellar



3. **Posible causas del daño:**

- Ligantes asfálticos envejecidos
- Uso de ligantes muy duros

4. **Dimensiones de la falla:**

Largo: 0,70 m

Ancho: 0,65 m

5. **Nivel de severidad:**

Media.

6. **Intervención recomendada:**

Sello de la fisura para evitar un daño más severo.

REGISTRO DE SELLO DE FISURAS

Fecha: 19 de diciembre del 2009

Ficha de inventario #: 1

Sitio de aplicación:

Ficha de aplicación #: 1

De: K0 + 40 m

Hasta: K0 + 50 m

Tipo de sellante utilizado: biosello SOEL

Foto 1. Aplicación del sellante

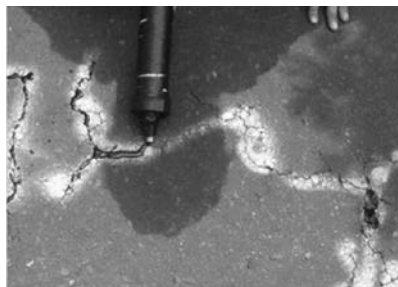
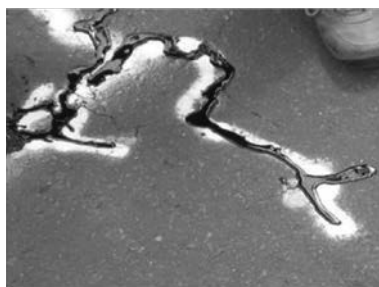


Foto 2. Apariencia final del sellado



Equipo usado:

- Asfalto modificado
- Pistola aplicadora
- Guantes de seguridad

Detalles del suelo:

- Temperatura de aplicación: 120 °C
- Longitud de sello: 3,5 m
- Tiempo de secado: 13 min

Observaciones generales:

El sello de la fisura se realizó mediante el ruteo, con lo cual se garantizó una aplicación correcta del procedimiento.

REGISTRO DE SEGUIMIENTO DEL SELLO DE FISURA DE LA CALLE 152

Fecha de seguimiento: 4 de enero del 2009

Ficha de aplicación referente #: 2

Sitio de seguimiento:

De: K0 + 40 m

Tipo de sellante utilizado: biosello SOEL

Ficha de seguimiento #: 2

Hasta: K0 + 50 m

Foto 1. Ubicación general de la falla



Foto 2. Falla sellada

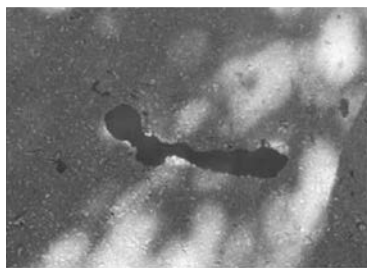
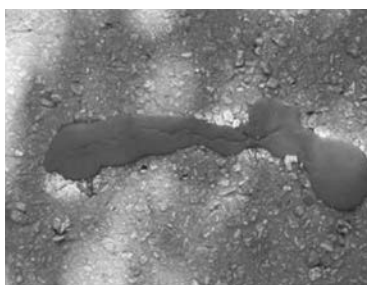


Foto 3. Detalle 1 de la falla sellada



Foto 2. Detalle 2 de la falla sellada



Observaciones generales:

El comportamiento del sellante, 16 días después de haber sido aplicado, ha sido bueno; no obstante, como se evidencia en las fotos, el sellante comenzó a tomar la forma de la fisura.

