

MEZCLAS ASFÁLTICAS ECOLÓGICAS

A, Figuerao-Infante¹, E. Fonseca Santanilla², C. Cubillos³

Grupo de Investigación, INDETEC

Universidad de La Salle, Colombia

figuerosofia@gmail.com

Fredy Alberto Reyes-Lizcano⁴

Grupo de Investigación, CECATA

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

fredy.reyes@javeriana.edu.co

RESUMEN

En este artículo se presentan los resultados experimentales obtenidos, sobre los materiales para carreteras y su mejoramiento a partir del empleo de desechos no biodegradables como el poliestireno y el caucho de llantas usadas. Se analizó una mezcla densa en caliente, de gran utilización en pavimentos flexibles. Se realizó el análisis químico y reológico de los ligantes modificados con desechos no biodegradables

En esta fase de la investigación se probó la respuesta de las mezclas asfálticas a efectos como el ahuellamiento, fatiga y la alteración del módulo dinámico según el modificador empleado. Para el análisis de la mezcla estudiada se caracterizaron los agregados, el asfalto y los modificadores. Se realizaron los ensayos para la estabilidad química, la deformación plástica, la fatiga y el módulo dinámico. Finalmente se analizaron los resultados obtenidos y se concluyó el beneficio, mejoramiento y utilización adecuada de la mezcla investigada. El alcance de esta fase de la investigación es la observación de la respuesta de este nuevo material para mezclas asfálticas.

PALABRAS CLAVES: mezclas asfálticas modificadas, poliestireno, polvo de llanta, reciclaje, pavimentos, fatiga trapezoidal, módulo dinámico, ahuellamiento, SARA.

INTRODUCCIÓN

Colombia es 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 y el desempeño de los materiales ante cambios bruscos de temperatura.

Los ligantes asfálticos modificados, son productos concebidos para superar las propiedades del asfalto original, mejorando así el desempeño del pavimento a largo plazo.

¹ Ingeniera civil, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia. Especialista en Gerencia de Construcciones y en Geotecnia Vial y de Pavimentos, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Máster en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Doctorando en Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Docente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: figuerosofia@unisalle.edu.co

² MSc Química. Profesora Departamento de Ciencias Básicas – Universidad de La Salle Correo electrónico: lfonseca@lasalle.edu.co

³ Joven investigador, Grupo INDETEC, Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. andres.cubillos26@gmail.com

⁴ Ingeniero civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Máster en Geotecnia y Estructuras, École National Supérieure de Mécanique. Doctor en Ciencias del Ingeniero, Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, y ENSM Francia. Profesor titular, Pontificia Universidad Javeriana. Director Maestría en Ingeniería Civil. Correo electrónico: fredy.reyes@javeriana.edu.co

Si bien los modificadores pueden afectar muchas propiedades, la mayoría de ellos intenta reducir la dependencia de la temperatura, el endurecimiento por oxidación del cemento asfáltico y la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica. (Coinsky, 1994).

Los *Bitúmenes Modificados con Polímeros* (BMP) empleados en pavimentación de carreteras, son materiales nuevos que en la actualidad son ampliamente empleados en pavimentación de carreteras con tráfico intenso ó con temperaturas extremas.

En términos generales los asfaltos modificados con polímeros mejoran propiedades tales como: menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, 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 CIB (proveniente del Complejo Industrial de Barrancabermeja⁵) cuando se modifica el ligante convencional con dos residuos poliméricos: poliestireno expandido (icopor) y polvo de llantas usadas.

A partir de de la caracterización fisicoquímica y mecánica, se fabricó una mezcla densa en caliente para Rodadura tipo MDC-2, Norma INVIAS, Colombia, debido a su gran utilización en el país.

MARCO TEORICO

1. LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO

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

Los modificadores empleados en esta investigación son:

Polvo de llanta: mejora la flexibilidad y la resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas reduciendo 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, siendo el SBR el más utilizado. Después de la polimerización este material contiene del 20 al 23% de estireno. La presencia del butadieno permite el entrecruzamiento con el azufre, siendo capaz de producir el isómero CIS⁶ que tiene una mayor elasticidad que la del caucho natural. El estireno permite tener un caucho más duro y más tenaz, haciendo que no se cristalice bajo grandes esfuerzos.⁷

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 & Dalton 1971).

En los ligantes modificados con polímeros, a elevadas temperaturas se pueden producir fenómenos de cremado y sedimentación enriqueciéndose el ligante en polímero en la

⁵ Refinería colombiana

⁶ Son isómeros que difieren de la distribución de átomos en la molécula

⁷ Ibid Figura 12

parte superior o inferior del tanque dependiendo de la densidad del polímero respecto al ligante. Esta desestabilización, se puede producir por falta de compatibilidad entre ambos y/o por dispersión incorrecta del polímero, porque el sistema y condiciones de mezclado sean deficientes.

Uno de los trabajos más antiguos y completos sobre asfaltos modificados con polímeros, es el de (Collins J. et al 1991) en el que los autores demostraron la efectividad de los polímeros en la mejora de propiedades del asfalto a altas y bajas temperaturas.

Socal Da Silva 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 2002) realizó una investigación para el empleo del caucho de llantas en pavimentos. En este se establece la metodología que se debe seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto del complejo industrial de Barrancabermeja (CIB) y de la refinería de Apiay, utilizando caucho molido.

(Reyes & Figueroa 2008) estudiaron diferentes tipos de mezclas asfálticas con diferentes gradaciones, modificadas por vía seca y vía húmeda modificadores provenientes de desechos no biodegradables aplicados de manera independiente en cada mezcla. El alcance de esta investigación fue de tipo físico mecánico. Finalmente se reseña el trabajo realizado por (Figueroa, Reyes 2005) en el que se elaboraron mezclas asfálticas modificadas por la vía húmeda, empleando asfalto del complejo industrial de Barrancabermeja 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.

2. 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% de plásticos, 13% papel y cartón, 7% vidrio, 3.5% metales, y 12% otros (textiles, cueros y cerámica)⁸. 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 con las basuras y demostrar que es posible aprovecharlas en materiales para carreteras, como lo hacen otros países en el mundo.

Si nos remontamos a los antecedentes sobre el aprovechamiento de residuos y ahorro energético se tiene que el mayor interés internacional lo ha suscitado la ORGANIZACION PARA LA COOPERACION Y DESARROLLO ECONOMICO, OCDE⁹.

⁸ En línea VISU, revista institucional de la contraloría de Cundinamarca. Las basuras y el reciclaje. Luis Héctor Loiza Segura. www.contraloriadecundinamarca.gov.co

⁹ 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

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 todo el proceso surgieron dos problemas aparentemente insuperables: la forma de incorporación del plástico al asfalto y la elección de un desecho adecuado. El primero de los dos problemas citados tenía su origen en la idea de que el plástico solo podía actuar en la mezcla bituminosa como modificador de las propiedades reológicas del asfalto y 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, Figueroa, 2008).

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

3. MEZCLA ASFÁLTICA

Para la investigación se diseñó una mezcla para rodadura MDC-2 norma INVIAS¹⁰ de gran utilización en el país. El proceso de diseño de mezcla fue *Marshall* y las características obtenidas se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Resultados del diseño de mezcla asfáltica

ENSAYO	RESULTADO			NORMA	Ensayo	Valor obtenido
Granulometría empleada	Tamiz	%pasa	%retenido	I.N.V. 213	Estabilidad mínima (lb)	2900
	3/4	100.0%	0.0%		Flujo (mm)	3.2
	1/2	90.0%	10.0%		Vacíos en la mezcla	4.9
	3/8	80.0%	10.0%			
	N°4	61.0%	19.0%		Vacíos en agregados	15.2
	N° 10	45.0%	16.0%			
	N° 40	21.0%	24.0%		Peso Unitario (g/cm ³)	2.240
	N° 80	12.0%	9.0%			
N° 200	6.5%	5.5%				

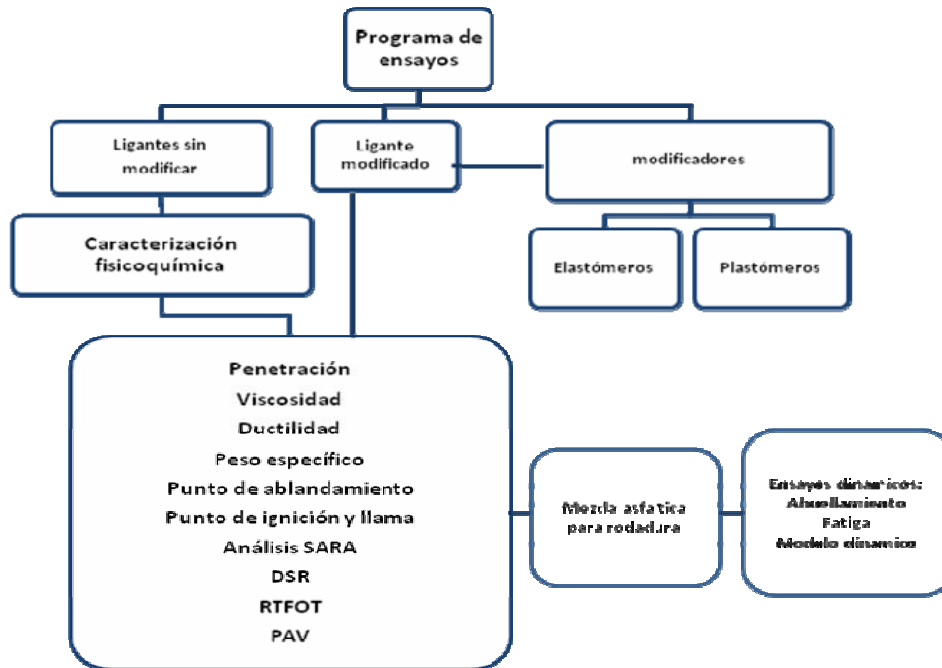
libre comercio. Alemania, Australia, Bélgica, Dinamarca, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, Suecia, Suiza, Turquía, Estados Unidos, Canadá, España, Japón, Finlandia, Australia, Nueva Zelanda y México.

¹⁰ INVIAS, Instituto Nacional de Vías, Colombia.

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 (vasos desechables de icopor) y el polvo de llantas usadas. El programa de ensayos realizado se observa en la Figura 1.

Figura 1 Programa de ensayos realizados en esta investigación



Los polímeros modificadores fueron caracterizados de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas en los laboratorios de Química de La Sede Candelaria de la Universidad de La Salle, mientras que fueron estudiados morfológicamente por microscopía electrónica de barrido SEM 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 30kV del CEIF (centro interfacultades) de la Universidad nacional de Colombia (Bogotá) en modo de operación alto vacío (3×10^{-6} torr).

1. Modificación del asfalto

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 (Figueroa A. 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 antes 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 a 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. No 5.348.994) en un equipo

construido para la investigación, el cual cumple con las especificaciones establecidas en The Shell Bitumen Handbook (2004). Ver Figura 2.

Figura 2 Dispensador de asfalto - Laboratorio Universidad de La Salle



Equipo dispensador de asfaltos
Universidad de La Salle



Proceso de modificación
del asfalto 80-100.

2. Caracterización del asfalto convencional y modificado

El asfalto del complejo industrial de Barrancabermeja de ECOPETROL (asfalto CIB) de penetración 80-100 original y las mezclas modificadas preparadas de acuerdo con el numeral 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 (INVIAS) e incluyó las siguientes pruebas: ductilidad, penetración, peso específico, punto de ignición y llama, punto de ablandamiento y pérdida de masa en película delgada.

Los ensayos que se explican de aquí en adelante sólo fueron realizados al asfalto convencional y al asfalto modificado que presentó los mejores resultados en los ensayos anteriores.

2.1 Caracterización química del ligante original y modificado

El procedimiento que describe la norma indica que el asfalto analizado mediante solventes se puede separar en cuatro (4) fracciones claramente diferenciables; una fracción en estado sólido la cual se identifica como Asfaltenos, los cuales aportan la rigidez y dureza al ligante, es la fracción más pesada. Las siguientes tres (3) 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 translucido. Inmediatamente después se destila los hidrocarburos aromáticos los cuales reaccionan a la presencia de tolueno y metanol, su color es amarillento. Por último se destilan las resinas en presencia de tricloroetileno, su color es café. Ver Figura 3.

El análisis de las cuatro fracciones o análisis SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos) se realizó por duplicado en cada una de las siguientes muestras:

ORIGINAL SIN MODIFICAR Y SIN ENVEJECER	ASF 80-100 SM-SE
ORIGINAL SIN MODIFICAR Y ENVEJECIDO	ASF 80-100 SM-E
MODIFICADO SIN ENVEJECER	ASF 80-100 M-SE
MODIFICADO ENVEJECIDO	ASF 80-100 M-E

Los resultados del análisis de cromatografía de columna por el método SARA, realizado para el Asfalto sin Modificar y modificado en condición sin envejecer y en condición envejecida por RTFO se observan en la Tabla 2, el cálculo del Índice de inestabilidad coloidal (IC), se determinó mediante la utilización de la Ecuación 1 y 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

Figura 3 Separación del asfalto en sus cuatro fracciones SARA (Saturados, Aromático, Resinas, Asfáltenos)



$$IC = \frac{\text{Constituyentes Floculados}}{\text{Constituyentes dispersados}} = \frac{\text{SATURADOS} + \text{ASFALTENOS}}{\text{AROMÁTICOS} + \text{RESINAS}}$$

(Ecuación 1)

$$IS = \frac{\text{RESINAS}}{\text{ASFALTENOS}} + \frac{\text{AROMÁTICOS}}{\text{SATURADOS}}$$

(Ecuación 2)

Si un asfalto es tipo GEL posee una baja susceptibilidad térmica y un mayor intervalo de temperatura entre el cambio de estado elástico a viscoso. Se caracteriza por tener una deformidad elástica retardada y por presentar bajas deformaciones permanentes debidas a la carga y 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 (dureza y rigidez), condición que ocasiona deformaciones permanentes (ahuellamiento) en la mezcla asfáltica. Si el asfalto es de tipo SOL-GEL, se caracteriza por su comportamiento elástico y una susceptibilidad térmica intermedia. Ver Tabla 2.

Tabla 2 Resultados del análisis SARA, Asfalto Sin Modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

ASFALTO	SATURADOS	AROMÁTICOS	RESINAS	ASFALTENOS	MALTENOS	IC	IS
Asfalto Sin Modificar - Muestra 2	19.45%	25.27%	42.32%	12.96%	87.04%	0.48	4.56
Asfalto Modificado - Muestra 3	14.21%	19.85%	44.94%	21.00%	79.00%	0.54	3.54
Asfalto Modificado - Muestra 4	14.54%	20.96%	42.50%	22.00%	78.00%	0.58	3.37
Asfalto Sin Modificar, Envejecido - Muestra 1	13.25%	34.97%	31.21%	20.58%	79.42%	0.51	4.16
Asfalto Sin Modificar, Envejecido - Muestra 2	11.88%	30.24%	36.23%	21.65%	78.35%	0.50	4.22
Asfalto Modificado, Envejecido - Muestra 3	12.56%	17.89%	46.43%	23.12%	76.88%	0.55	3.43
Asfalto Modificado, Envejecido - Muestra 4	13.83%	16.08%	45.66%	24.42%	75.58%	0.62	3.03

A continuación se presentan algunos índices calculados a partir de las cuatro fracciones de cada muestra analizada. Ver Tabla 3.

Tabla 3 Índices del análisis SARA, Asfalto Sin Modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido.

ASFALTO	SATURADOS / RESINAS	SATURADOS / AROMÁTICOS	AROMÁTICOS / RESINAS	RESINAS / AROMÁTICOS	RESINAS / ASFALTENOS
Asfalto Sin Modificar - Muestra 2	0.46	0.77	0.60	1.67	3.27
Asfalto Modificado - Muestra 3	0.32	0.72	0.44	2.26	2.14
Asfalto Modificado - Muestra 4	0.34	0.69	0.49	2.03	1.93
Asfalto Sin Modificar, Envejecido - Muestra 1	0.42	0.38	1.12	0.89	1.52
Asfalto Sin Modificar, Envejecido - Muestra 2	0.33	0.39	0.83	1.20	1.67
Asfalto Modificado, Envejecido - Muestra 3	0.27	0.70	0.39	2.60	2.01
Asfalto Modificado, Envejecido - Muestra 4	0.30	0.86	0.35	2.84	1.87

Con estos resultados se observa que el asfalto modificado en sus dos estados: sin envejecer y envejecido, se considera un asfalto tipo GEL, en tanto que las muestras de asfalto sin modificar se considera tipo SOL-GEL. Se puede observar que aquellas muestras en donde el porcentaje de asfaltenos es mayor se considera más rígido, debido a que los asfaltenos le dan al ligante propiedades estructurales o de rigidez; lo mismo ocurre con las resinas, las cuales también deben aumentar. Estos resultados se confirman al observar la Tabla 4, en donde se constata que los asfaltos modificados son más rígidos, al disminuir la penetración en las muestras, al igual que la ductilidad.

Tabla 4 Resultados del análisis físico del asfalto sin modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido

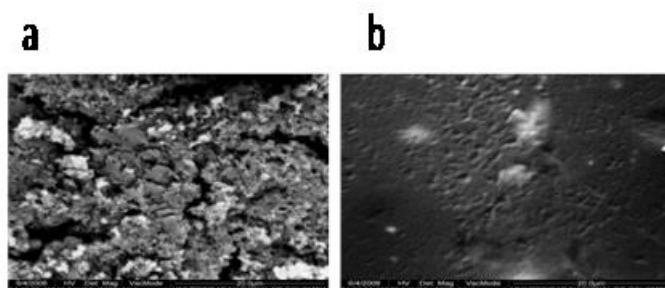
ENSAYO	UNIDAD	NORMATIVIDAD	ASFALTO NORMAL				ASFALTO MODIFICADO			
			MIN.	MAX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO	MIN.	MAX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO
DUCTILIDAD (25°C, 5cm/min)	cm	INV-E-702	100	-	140	140	15	-	42.9	35
PENETRACIÓN (25°C, 100g, 5s)	0.1 mm	INV-E-706	80	100	90	31	55	70	60	47
GRAVEDAD ESPECIFICA	g/cm ³	INV-E-707	-	-	1.0083	N.A.	-	-	1.0262	N.A.
PTO. IGNICIÓN	°C	INV-E-709	230	-	306	N.A.	230	-	299	N.A.
PTO. LLAMA	°C	INV-E-709	-	-	348	N.A.	-	-	349	N.A.
PTO. ABLANDAMIENTO	°C	INV-E-712	-	-	46	48.5	58	-	55	55
INDICE DE PENETRACIÓN	-	INV-E-724	-1	+1	-0.7907	-2.5159	-1	+1	0.4394	-0.0648
VISCOSIDAD BROKFIELD (80°C)	cP.	INV-E-717	-	-	21642	36902	-	-	147333	147125
VISCOSIDAD BROKFIELD (135°C)	cP.	INV-E-717	-	-	418.8	583.3	-	-	3106	2533.9
VISCOSIDAD BROKFIELD (180°C)	cP.	INV-E-717	-	-	75	86.9	-	-	521	426.5
PERDIDA DE MASA	%	INV-E-720	-	1%	-0.431%		-	1%	-0.511	
RECUPERACIÓN ELASTICA	%	INV-E-742	-	-	N.A.	N.A.	-	-	61.17%	59.00%
PENETRACIÓN AL RESIDUO % DE LA ORIGINAL	%	INV-E-706	48	-	34%		65	-	78%	
INCREMENTO PTO. ABLANDAMIENTO AL RESIDUO	°C	INV-E-712	-	5	2.5		-	-	0	

Con estos índices químicos se puede comenzar a definir y a predecir el comportamiento del ligante durante su vida útil.

Al observar la **Tabla 2** se identifica que el asfalto modificado sin envejecer y envejecido en RTFO, 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, esto por ser los asfáltenos y las resinas quienes le aportan al asfalto la estabilidad y soporte dentro de la mezcla.

Otro ensayo realizado al ligante modificado fue 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 4 enlaces C-H aromáticos) 1605 cm⁻¹ (bandas de estiramiento de carbonos aromáticos) 1705 cm⁻¹ (bandas de estiramiento de grupos carbonilo y/o carboxilo), 2852 cm⁻¹ y 2923 cm⁻¹ (bandas de vibración de estiramiento de enlaces C-H.) y 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 4 se presentan las fotografías obtenidas para las muestras de asfalto desoleizadas por microscopia electrónica de barrido SEM de alto vacío, para el asfalto CIB convencional y modificado.

Figura 4 a) Análisis SEM del asfalto CIB convencional (6000X)¹¹ b) Análisis SEM asfalto CIB modificado (6000X)¹²



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

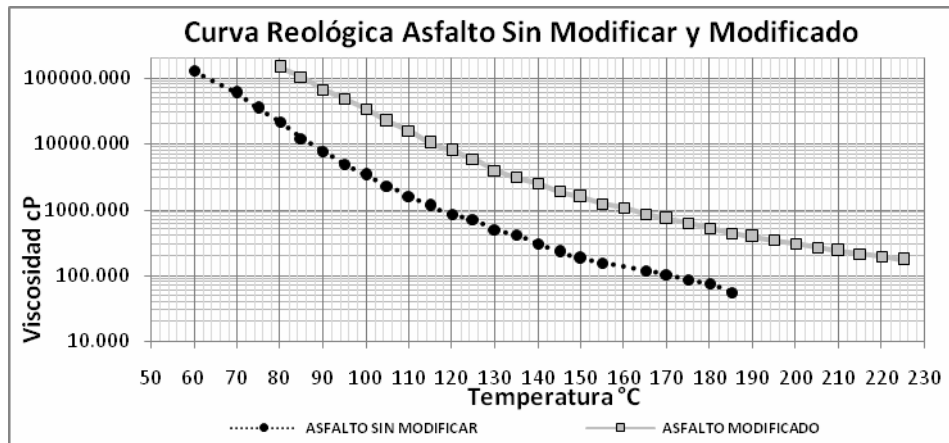
2.2 Curva de Viscosidad Brookfield

Para tener un indicativo del cambio de viscosidad con la variación de la temperatura aquella se midió a partir del ensayo en el viscosímetro Brookfield. Ver **Figura 5**.

¹¹ Las autoras, 2008

¹² Las autoras, 2008

Figura 5 Comparación de curva reológica entre el Asfalto Sin Modificar y el modificado, sin envejecer.



2.3 PROCESO DE ENVEJECIMIENTO PRIMARIO EN RTFO

Luego de haber realizado la caracterización física del ligante normal y modificado en estado sin envejecer, se procedió a realizar el proceso de envejecer el ligante mediante el uso del Horno Rotatorio de Película Delgada RTFO, ver **Figura 6**, este método se utiliza para llevar el ligante asfáltico a una condición igual o cercana a la cual presentaría al momento de entrar en servicio. Ver figura 6.

Figura 6 Prueba Envejecimiento primario en horno RTFO



Figura 7 Variación de masa después de RTFO.

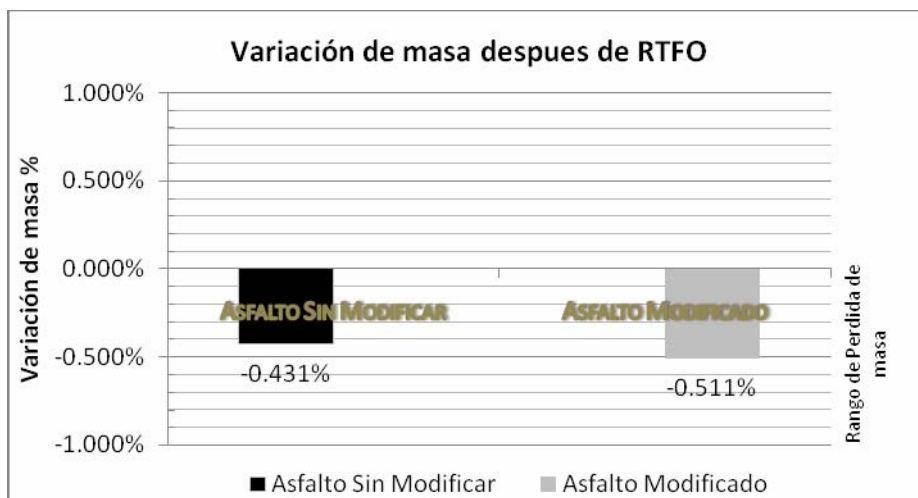


Figura 8. Comparación de curva reológica entre el Asfalto Sin Modificar y el modificado, envejecido

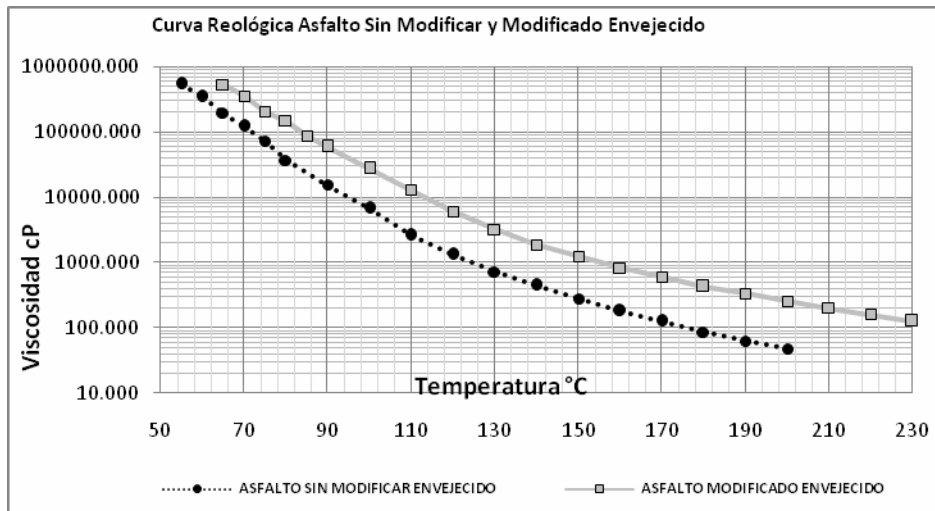


Tabla 5 Resultados análisis físico del Asfalto Sin Modificar y modificado en estado sin envejecer y envejecido.

ENSAYO	UNIDAD	NORMATIVIDAD	ASFALTO NORMAL				ASFALTO MODIFICADO			
			MIN.	MAX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO	MIN.	MAX.	SIN ENVEJECER	ENVEJECIDO
DUCTILIDAD (25°C, 5cm/min)	cm	INV-E-702	100	-	140	140	15	-	42.9	35
PENETRACIÓN (25°C, 100g, 5s)	0.1 mm	INV-E-706	80	100	90	31	55	70	60	47
GRAVEDAD ESPECIFICA	g/cm ³	INV-E-707	-	-	1.0083	N.A.	-	-	1.0262	N.A.
PTO. IGNICIÓN	°C	INV-E-709	230	-	306	N.A.	230	-	299	N.A.
PTO. LLAMA	°C	INV-E-709	-	-	348	N.A.	-	-	349	N.A.
PTO. ABLANDAMIENTO	°C	INV-E-712	-	-	46	48.5	58	-	55	55
INDICE DE PENETRACIÓN	-	INV-E-724	-1	.+1	-0.7907	-2.5159	-1	.+1	0.4394	-0.0648
VISCOSIDAD BROKFIELD (80°C)	cP.	INV-E-717	-	-	21642	36902	-	-	147333	147125
VISCOSIDAD BROKFIELD (135°C)	cP.	INV-E-717	-	-	418.8	583.3	-	-	3105	2533.9
VISCOSIDAD BROKFIELD (180°C)	cP.	INV-E-717	-	-	75	86.9	-	-	521	426.5
PERDIDA DE MASA	%	INV-E-720	-	1%	-0.431%		-	1%	-0.511	
RECUPERACIÓN ELASTICA	%	INV-E-742	-	-	N.A.	N.A.	-	-	61.17%	59.00%
PENETRACIÓN AL RESIDUO % DE LA ORIGINAL	%	INV-E-706	48	-	34%		65	-	78%	
INCREMENTO PTO. ABLANDAMIENTO AL RESIDUO	°C	INV-E-712	-	5	2.5		-	-	0	

2.4 Reología con reómetro de corte DSR

El análisis reológico se determinó mediante la utilización del Reómetro de Corte Dinámico DSR de la Universidad Javeriana, ver Figura 9, el cual está reglamentado en la AASHTO TP-5. Su funcionamiento radica en la aplicación de un patrón sinusoidal de tensiones de corte sobre una muestra previamente definida (1mm de espesor y 25mm de diámetro ó 2mm de espesor y 8mm de diámetro), y 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.

Figura 9 Reómetro de Corte Directo DSR



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 recuperable).

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. Ver Tabla 6 y figura 9.

Tabla 6 Control de ahuellamiento en el DSR

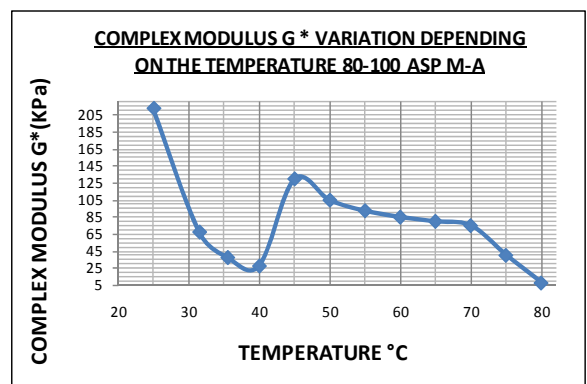
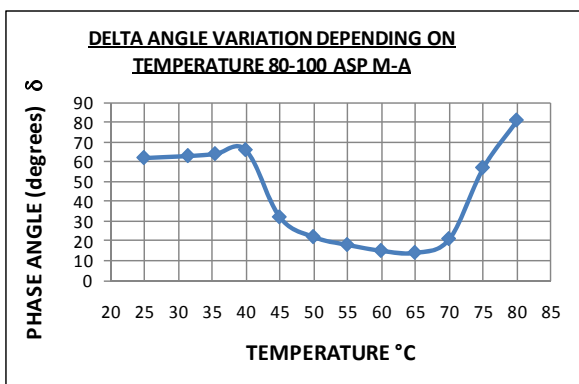
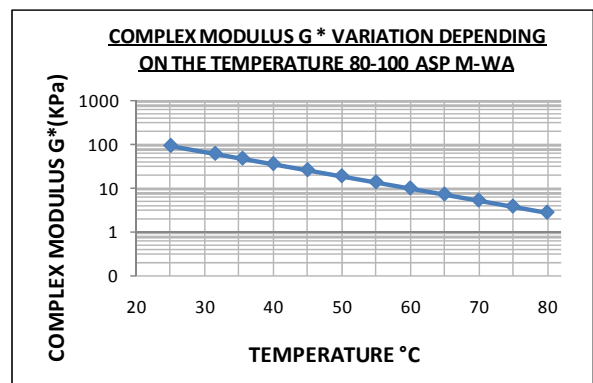
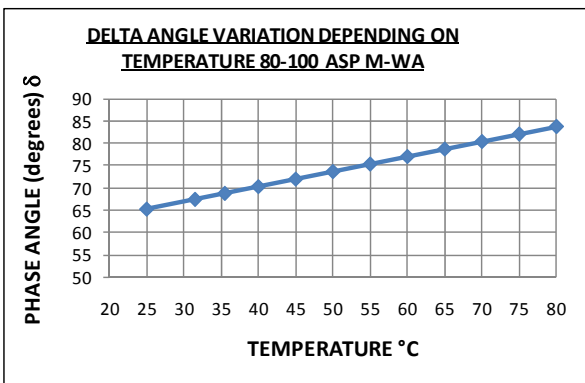
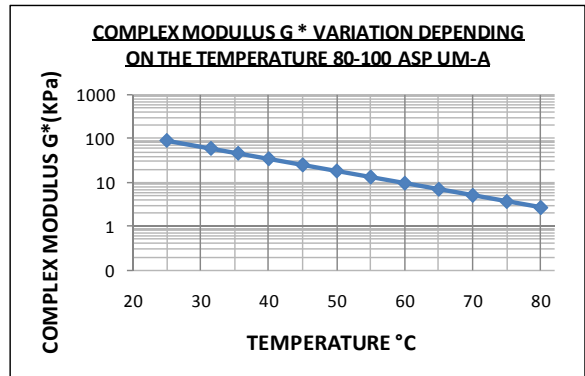
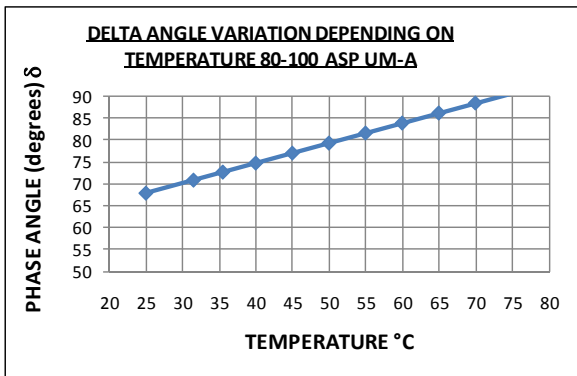
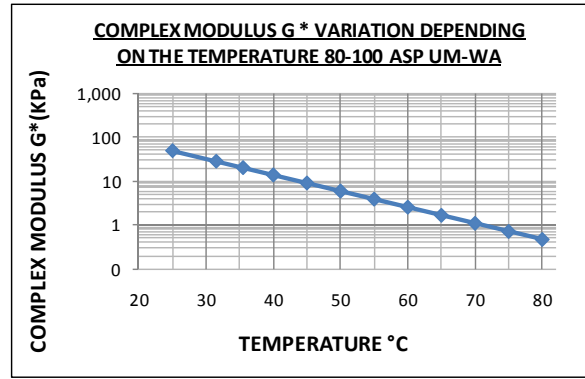
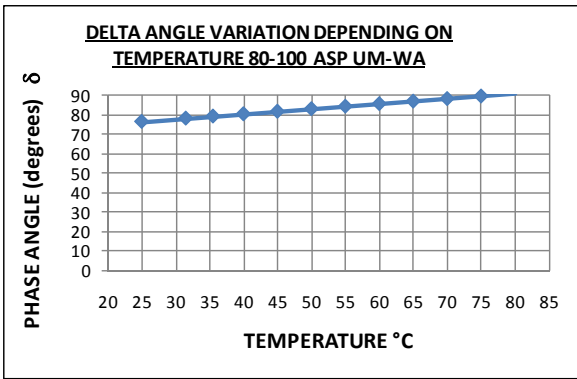
FORMULA	TIPO DE ASFALTO
$G^*/\text{sen}(\delta) > 1 \text{ kPa}$	Asfalto original
$G^*/\text{sen}(\delta) > 2.2 \text{ kPa}$	Asfalto envejecido RTFO

2.4.1 Resultados de los ligantes asfálticos en el DSR para el asfalto sin modificar, modificado y envejecidos respectivamente.

De estos resultados se observa que para el caso del asfalto modificado y sin modificar a medida que la temperatura aumenta el ángulo δ aumenta, 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 ya que al aumentar el módulo la mezcla seguramente tendrá una mejor respuesta a las cargas impuestas por el tráfico con bajas deformaciones.

MODULO COMPLEJO		
ASFALTO	T°C	$ G^* \text{ Pa}$
SM-SE	60	1757
SM-E	60	2652
M-E	60	94249
M-SE	60	46362

Figura 10 Gráficas obtenidas en el ensayo DSR,

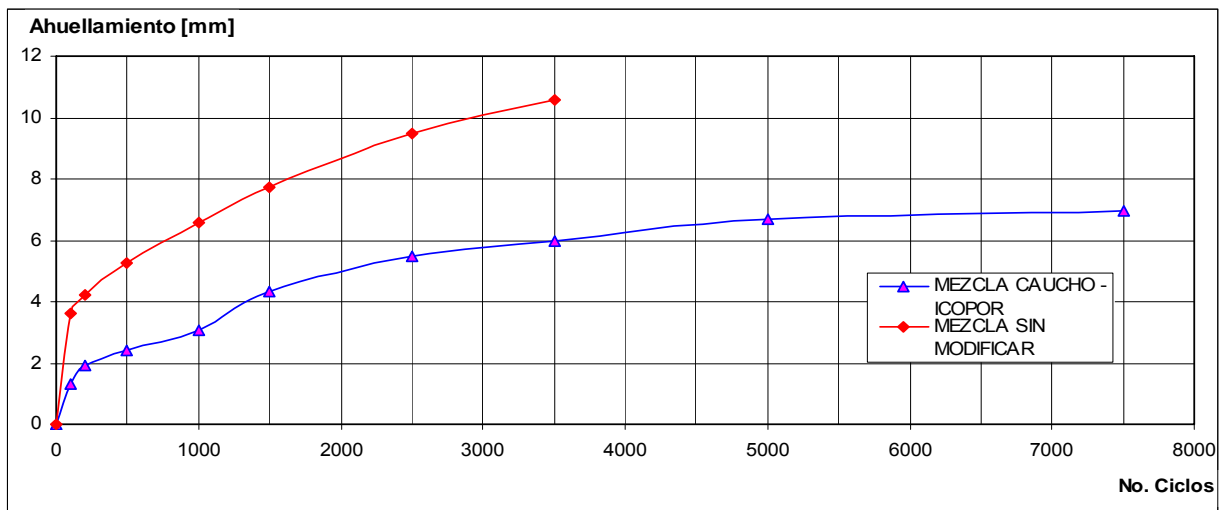


2.1 Ensayos dinámicos

2.1.1 Ahuellamiento

La deformación plástica obtenida para la mezcla modificada indica una reducción del 4%, aspecto de relevancia para vías de alto tráfico eventualmente canalizado, tipo Transmilenio (buses articulados de capacidad 160 personas de Bogotá). La figura a continuación indica los resultados de la misma, para la mezcla convencional y la modificada.

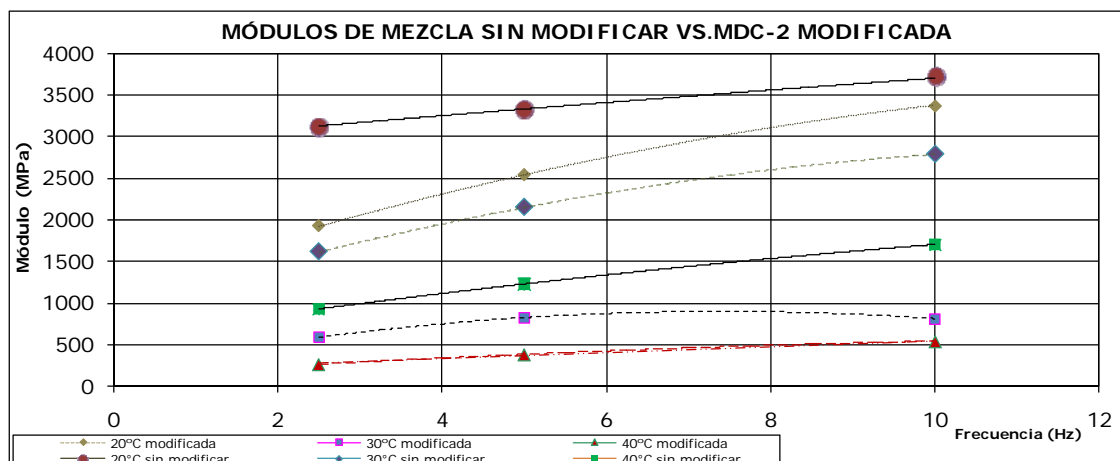
Figura 11. Comparación de los resultados obtenidos en el ensayo de ahuellamiento para la mezcla de asfalto CIB original y modificado



2.1.2 Módulo Dinámico

De la comparación entre los módulos de la mezcla sin modificar y modificada se observa que a 20°C y 10Hz, éste es muy parecido para los dos tipos de mezclas. A pesar de que el módulo de la mezcla asfáltica modificada no aumento considerablemente como se esperaba, se encuentra en el rango trabajable para un clima como el de Bogotá. Ver Figura 12.

Figura 12. Comparación del módulo dinámico para una mezcla MDC-2 sin modificar y modificada con polvo de llanta y poliestireno

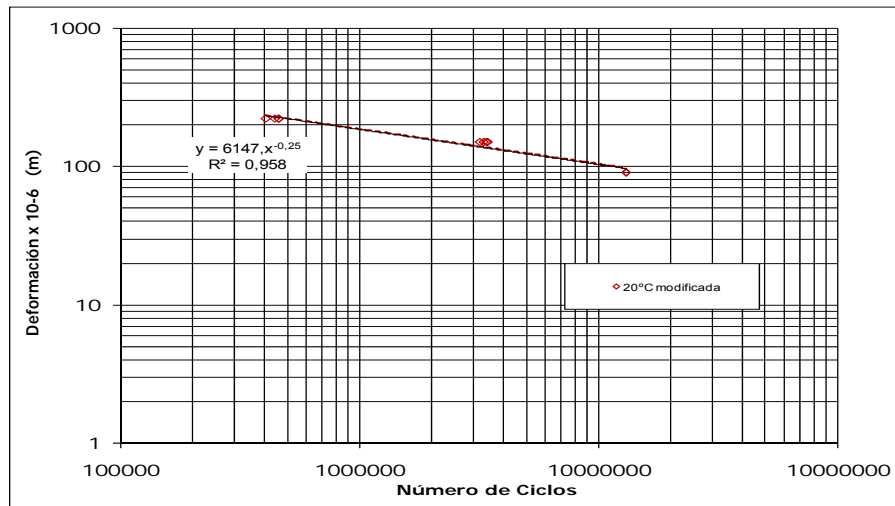


En este ensayo de fatiga realizado según norma NF P 98-261-1 se observa que la ley de fatiga arroja una pendiente b de $-0,25$, la cual se encuentra en los rangos normales para mezclas asfálticas. La deformación máxima permitida según este ensayo para la mezcla modificada es la mostrada en la ecuación.

$$\epsilon_s = 194 \times 10^{-6} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La deformación obtenida al millón de ciclos para la mezcla modificada es menor que la obtenida para el mismo número de ciclos para la mezcla asfáltica convencional. En una mezcla convencional $\epsilon_s = 120 \times 10^{-6}$ y b de $-0,22$

Figura 13. Ley de fatiga para la mezcla modificada se muestra a continuación



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 tales como la susceptibilidad térmica, resistencia a la fatiga, inflamabilidad y resistencia a los solventes. De acuerdo a 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 contribuyendo a la solución de un grave problema ambiental. Los resultados indicaron que no se verificó un cambio significativo en la estructura química del ligante siendo el asfalto CIB modificado obtenido una mezcla física 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. La ley de fatiga para la mezcla modificada con poliestireno y polvo de llanta presentó una ley de fatiga de 194×10^{-6} , valor que resulta coherente con el encontrado en la investigación del IDU para solo polvo de llanta, 180×10^{-6} y una mezcla sin modificar de 120×10^{-6} . La deformación plástica comprobada a través del ensayo de ahuellamiento tuvo una disminución significativa en la mezcla modificada respecto a la convencional. La reducción fue del 4% aproximadamente, esto es importante para evitar ahuellamiento o hundimiento en las zonas expuestas a cargas repetidas y canalizadas. 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, entre otros, en las mezclas asfálticas para pavimentos. De los ensayos

con el reómetro de corte se determina que el ligante modificado sin envejecer es más elástico que el ligante sin modificar. Condición que contribuye con la recuperación que tendrá la mezcla bajo cargas cíclicas. Respecto al desempeño en la condición envejecida, es necesario realizar nuevas pruebas de repetitividad para estudiar los puntos que se generan en el ensayo de manera atípica. Vale la pena tener en cuenta que es un nuevo material y se debe encontrar el nuevo desempeño del mismo. El módulo complejo del ligante modificado es mayor respecto al módulo complejo del ligante sin modificar, en el rango de 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.

A manera de ejemplo se presenta la incidencia que tendría un modificador como el analizado, en el espesor de una mezcla asfáltica.

Al realizar un diseño con mezcla convencional y otro con la mezcla modificada se obtienen las siguientes estructuras:

Tráfico de diseño	Módulo Resiliente de la subrasante (MPa)	Módulo mezcla asfáltica convencional (MPa)	Módulo mezcla asfáltica modificada (MPa)	$\epsilon_6 \times 10^{-6}$ Mezcla convencional	$\epsilon_6 \times 10^{-6}$ Mezcla modificada	Espesor Mezcla convencional cm	Espesor Mezcla modificada cm
500000	50	3500	3540	120	194	Mezcla asfáltica:24cm	Mezcla asfáltica:16cm

Es decir que se tiene una reducción del espesor de carpeta asfáltica del 34%, para un suelo de mala calidad como el de Bogotá.

REFERENCIAS

- 2 Agnusdei Jorge ASFALTOS MODIFICADOS Y SUS APLICACIONES [Sección del libro] // Ingeniería de Pavimentos / aut. libro AGNUSDEI Jorge. - Bogota : [s.n.], 1997.
- 3 Amaya Claudia y Prieto Martha 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] : Trabajo de grado Ingeniería Civil / Universidad de La Salle - Facultad de Ingeniería Civil. - Bogotá : [s.n.], 2008. - pág. 160.
- 4 Ander Paul y Sonnessa Anthony J Macromoléculas [Sección del libro] // Principios de química introducción a los conceptos teóricos. - Mexico : Limusa S.A1996.
- 5 Arenas Hugo La Modificación de los asfaltos colombianos: una respuesta al deterioro prematuro de los asfaltos [Conferencia] // 4ta Jornadas Internacionales del Asfalto - Agosto 18-20. - Cartagena de Indias : [s.n.], 2004.
- 6 Arenas Hugo TECNOLOGÍA DEL CEMENTO ASFALTICO [Libro]. - Bogotá : FAID, 2005. - 4ta Ed..
- 7 Asphalt Institute BACKGROUND OF SUPERPAVE ASPHALT BINDER TEST METHODS [Report]. - Lexington, KY : Federal Highway Administration, 1994.
- 8 Botasso, G.; Gonzalez, O.; Rosato, M.; Rebollo, O.; Rivera, J. ASFALTO MODIFICADOS FIJACIÓN DE RESIDUOS CONTAMINANTES [Publicación periódica] / ed. Plata Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La. - Buenos Aires : [s.n.], 2000.
- 9 Collins, J. et al. Improved performance of paving asphalts by polymer modification, Journal of the Association of Asphalt pavieng technologists (AAPT), 1991, vol,60. Pp.43-79.
- 10 Cuellar Andrea del Pilar ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS LEYES DE FATIGA DE UNA MEZCLA CERRADA 0/10, CON Y SIN ADICIONES DE ICOPOR [Informe] : Trabajo de grado Ingeniero Civil / Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Ingeniería Civil. - Bogotá : [s.n.], 2003. - pág. 233.

- 11 Cubillos Estrella Carlos Andrés 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] : Trabajo de grado Ingeniero Civil / Universidad de La Salle - Facultad de Ingeniería Civil. - Bogotá : [s.n.], 2011 - pág. 214.
- 12 Estrada Juan y Gonzalez Alejandro MEJORAMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFALTICAS DRENANTES UTILIZANDO COMO LIGANTE EL ASFALTO-CAUCHO [Informe] : Trabajo de Grado Ingeniería Civil / Pontificia Universidad Javeriana - Facultad de Ingeniería. - Bogotá : [s.n.], 2002. - pág. 158.
- 13 Figueroa, Ana; Reyes, Fredy; Hernandez, Diana; Jimenez, Cristian; Bohórquez, Natalia ANÁLISIS DE UN ASFALTO MODIFICADO CON ICOPOR Y SU INCIDENCIA EN UNA MEZCLA ASFÁLTICA DENSA EN CALIENTE [Publicación periódica] // Revista Ingeniería e Investigación. - Bogotá : [s.n.], Diciembre de 2007. - 3 : Vol. 27. - págs. 5 - 15.
- 14 Figueroa Ana y Reyes Fredy ASFALTO MODIFICADOS CON POLIESTIRENO [Informe] : Trabajo de Investigación / Universidad de La Salle - Pontificia Universidad Javeriana. - Bogotá : [s.n.], 2005. - pág. 83.
- 15 Figueroa Ana, Fonseca Elsa y Reyes Fredy CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE ASFALTOS MODIFICADOS CON MATERIAL RECICLADO [Publicación periódica] // Ingeniería y Universidad / ed. Javeriana Pontificia Universidad. - Bogotá : [s.n.], 2009. - 13 : Vol. I. - págs. 45-70.
- 16 Figueroa Ana, Fonseca Elsa ASFALTO MODIFICADO CON POLIESTIRENO Y POLVO DE LLANTA [Informe] : Trabajo de Investigación / Universidad de La Salle - Bogotá : [s.n.], 2010 - pág. 200.
- 17 Hernández Gabriel MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES TERMO-MECÁNICAS DE ASFALTO MODIFICADO CON COPOLÍMEROS DE ESTIRENO-BUTADIENO [Informe] : presentado en CONINFRA Junio 2007 - Sao Paulo, Brasil / Asistencia Técnica y Desarrollo. Dynasol Elastómeros. - Mexico : [s.n.], 2007.
- 18 Heshmat A. POLYMER MODIFIERS FOR IMPROVED PERFORMANCE OF ASPHALT MIXTURE [Publicación periódica]. - Texas : Texas Transportation Institute, 1995.
- 19 INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS NORMAS DE ENSAYO DE MATERIALES PARA CARRETERAS [Libro]. - Bogotá : Escuela Colombiana de Ingeniería, 2007.
- 20 Instituto de Desarrollo Urbano ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECANICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS [Informe]. - Bogotá: [s.n.], 2002. - pág. 216.
- 21 Reyes Fredy y Figueroa Ana Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana [Libro]. - Bogota : JAVEGRAF, 2008. - pág. 103. ISBN 978-958-716-136-6
- 22 Sánchez Arnulfo ANALISIS COMPARATIVO DE LAS CARACTERISTICAS FÍSICAS ENTRE EL ASFALTO CONVENCIONAL Y EL ASFALTO MODIFICADO CON POLIESTORENO Y LLANTA TRITURADA [Informe] : Trabajo de grado Ingeniero Civil / Universidad de La Salle - Facultad de Ingeniería Civil. - Bogotá : [s.n.], 2006. - pág. 306.
- 23 Socal da Silva Leticia, de Camargo Forte Maria, de Alencastro Vignol Leonardo y Medeiros Cardozo Nilo STUDY OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF PURE AND POLYMER-MODIFIED BRAZILIAN ASPHALT BINDERS [Journal] : Journal of Materials Science, 2004, Volume 39, Number 2, Pages 539-546