


**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN CEMENTO
ASFÁLTICO 60/70 MODIFICADO CON RESIDUOS DE LA FABRICACIÓN DE
PRODUCTOS CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD**



**HERNANDO LUQUE ARIZA
ALVARO JOSÉ RINCÓN SOLANO**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2011**

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN CEMENTO
ASFÁLTICO 60/70 MODIFICADO CON RESIDUOS DE LA FABRICACIÓN DE
PRODUCTOS CON POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD**

**HERNANDO LUQUE ARIZA
ALVARO JOSÉ RINCÓN SOLANO**



Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

**MANUEL SANTIAGO OCAMPO
Ingeniero Civil Ph.DM.Sc.**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL**

2011

DEDICATORIA

A nuestros familiares y amigos quienes fueron el principal apoyo para culminar satisfactoriamente esta etapa de nuestras vidas.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos un agradecimiento cordial a:

El ingeniero Manuel Santiago Ocampo Terreros, director de nuestro trabajo de grado, por su constante colaboración y apoyo durante el desarrollo de este proyecto. A todo el equipo del personal de laboratorios de la facultad de Ingeniería Civil, quienes facilitaron los ensayos necesarios para la ejecución del proyecto.

A la empresa Manufacturas y Procesos Industriales LTDA, MPI, especialmente al ingeniero Leonel Alvarez, que muy amablemente nos permitió el uso de los equipos de laboratorio que en su momento necesitamos para nuestro trabajo.

A todos los docentes que de una manera cordial fueron fuente de información y ayudaron a culminar esta investigación, en especial a la ingeniera Sofía Figueroa quien con sus amplios conocimientos en el tema nos colaboró muy amablemente.

RESUMEN

Tras la realización de un estudio previo referente a la modificación de asfaltos, sus ventajas, desventajas y procedimiento, se decidió llevar a cabo una investigación donde se analizarían las propiedades físicas de un asfalto modificado con polietileno de baja densidad, LDPE por sus siglas en inglés (Low Density Polyethylene) por la vía húmeda, respecto a uno convencional de penetración 60/70 proveniente de Barrancabermeja. Basados en la bibliografía encontrada, se establecieron parámetros fijos y variables dentro de la modificación. Los parámetros fijos en el proceso de modificación fueron: la temperatura de reacción (150 °C) y las revoluciones a las que giraba el brazo que mezcla el asfalto con el polímero (6000 RPM); los parámetros que se variaron durante el proceso fueron: porcentaje de adición de LDPE (1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% y 7%) y los tiempos de reacción para la mezcla (30 min, 60 min y 90 min).

Estos parámetros llevaron a realizar 21 muestras, provenientes de las combinaciones de porcentajes añadidos y tiempos de mezclado, y una 22 que fue la muestra del asfalto sin modificar. Los ensayos que se le practicaron a cada una de estas las muestras fueron: penetración, ductilidad, viscosidad Brookfield y punto de ablandamiento, solo a las muestras de asfalto modificado se les realizó el ensayo de recuperación elástica por torsión.

El objetivo principal del trabajo de investigación fue determinar los valores de porcentaje añadido y tiempo de mezclado óptimos para mejorar las características físicas del cemento asfáltico, basándose en algunos de los parámetros especificados por el Instituto Nacional de Vías para este tipo de asfalto modificado.

Lo anterior permitió determinar que las condiciones óptimas de modificación para un asfalto normalizado 60/70 eran, un porcentaje de polietileno de baja densidad de 6%, y un tiempo de mezclado de 30 minutos.

Con el fin de determinar los parámetros de desempeño y comportamientos del ligante óptimo modificado con polietileno de baja densidad, se realizaron ensayos complementarios como envejecimiento en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT), envejecimiento en cámara a presión (PAV), y caracterización reológica utilizando el reómetro de corte dinámico (DSR).

El presente trabajo permitió determinar que a medida que se aumenta el contenido de polietileno de baja densidad (LDPE) para modificar el ligante, se incrementa la consistencia de mismo, aumenta también la temperatura a la cual tiende a fluir, la capacidad del material de retomar su forma, y la viscosidad cinemática; por el contrario, se encontró que la capacidad de elongación del material decrece. El análisis según las especificaciones Superpave indican que este ligante con 6% de LDPE y un tiempo de mezclado de 30 minutos, mejora su resistencia al ahuellamiento y la resistencia a la fisuración por fatiga; comportamientos que son muy favorables para una mezcla asfáltica. Sin embargo, no se logró conocer con certeza el grado de desempeño del ligante modificado, ya que para no fue posible, por disponibilidad del equipo, adelantar el ensayo de viga a flexión (BBR).

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<u>1 MARCO CONCEPTUAL</u>	1
1.1 ASFALTO	1
1.1.1 ASFALTO NORMALIZADO	3
1.2 MODIFICACIÓN DE ASFALTOS	5
1.2.1 CEMENTOS ASFÁLTICOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS	5
1.2.2 EXPERIENCIA COLOMBIANA EN EL USO DE ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS	8
1.3 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)	8
1.4 ESPECIFICACIONES SUPERPAVE PARA LIGANTES ASFÁLTICOS	10
1.4.1 DEFORMACIÓN PERMANENTE	10
1.4.2 FISURACIÓN POR FATIGA	11
1.4.3 GRADO DE DESEMPEÑO DE UN LIGANTE	12
<u>2 MATERIALES Y MÉTODOS</u>	14
2.1 MATERIALES	14

2.1.1 CEMENTO ASFÁLTICO	14
2.1.2 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD	15
2.2 DISEÑO DE MUESTRAS	18
2.3 MODIFICACIÓN DE LIGANTE ASFÁLTICO CON LDPE	20
2.4 EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS	22
2.4.1 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS	22
2.4.2 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA)	24
2.4.3 RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN DE ASFALTOS MODIFICADOS	26
2.4.4 DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS	28
2.4.5 VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO EL VISCOSÍMETRO ROTACIONAL	29
2.4.6 ENVEJECIMIENTO DEL LIGANTE EN EL HORNO DE LÁMINA ASFÁLTICA DELGADA EN MOVIMIENTO	32
2.4.7 ENVEJECIMIENTO DEL LIGANTE EN LA CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO A PRESIÓN	33
2.4.8 CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCO-ELÁSTICO POR MEDIO DEL REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO DSR	35
3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
3.1 ESCOGENCIA DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE MODIFICACIÓN	37
3.1.1 VERIFICACIÓN POR PENETRACIÓN	37
3.1.2 VERIFICACIÓN POR PUNTO DE ABLANDAMIENTO	39

3.1.3 VERIFICACIÓN POR RECUPERACIÓN ELÁSTICA	40
3.2 DISEÑO ÓPTIMO	42
3.3 ENSAYOS COMPLEMENTARIOS	42
3.3.1 ANÁLISIS POR DUCTILIDAD	43
3.3.2 ANÁLISIS POR VISCOSIDAD CINEMÁTICA	44
3.4 ENSAYOS ESPECIALES REALIZADOS SOBRE EL DISEÑO ÓPTIMO	53
3.4.1 ANÁLISIS POR DEFORMACIÓN PERMANENTE	53
3.4.2 ANÁLISIS POR FISURA A LA FATIGA	54
3.4.3 DETERMINACIÓN DEL GRADO DE DESEMPEÑO	56
<u>4 CONCLUSIONES</u>	<u>58</u>
<u>5 RECOMENDACIONES</u>	<u>59</u>
<u>6 BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>60</u>

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1. Diagrama de flujo para asfalto de petróleo</i>	<i>2</i>
<i>Figura 2. Esquema proceso de destilación del petróleo</i>	<i>3</i>
<i>Figura 3. Símbolo de identificación para el Polietileno de baja densidad</i>	<i>9</i>
<i>Figura 4. Cadena ramificada del Polietileno de baja densidad</i>	<i>10</i>
<i>Figura 5. Resultados ensayo de Penetración.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 6. Resultados ensayo de Punto de ablandamiento</i>	<i>40</i>
<i>Figura 7. Resultados ensayo de Recuperación elástica por torsión.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 8. Resultados ensayo de Ductilidad.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 9. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 30 minutos.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 10. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 60 minutos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 11. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 90 minutos.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 1%</i>	<i>47</i>

<i>Figura 13. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 2%</i>	<i>47</i>
<i>Figura 14. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 3%</i>	<i>48</i>
<i>Figura 15. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 4%</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 5%</i>	<i>49</i>
<i>Figura 17. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 6%</i>	<i>49</i>
<i>Figura 18. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 7%</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19. Temperaturas de Mezclado.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 20. Temperaturas de Compactación</i>	<i>52</i>
<i>Figura 21. Factor de ahuellamiento para diseño óptimo sin envejecer y para asfalto convencional 60/70 sin envejecer</i>	<i>54</i>
<i>Figura 22. Factor de agrietamiento por fatiga para el diseño óptimo envejecido (PAV) y para un asfalto convencional 60/70 envejecido (PAV)</i>	<i>55</i>

LISTA DE TABLAS

	Pág.
<i>Tabla 1. Especificaciones de cementos asfálticos modificados con polímeros.....</i>	<i>7</i>
<i>Tabla 2. Especificaciones para clasificación del grado de desempeño de cementos asfálticos</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Especificaciones de Asfalto Normalizado 60/70.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 4. Especificaciones de Polietileno de baja densidad</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 5. Gradación del LDPE utilizado en la modificación del ligante.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. Valores de Penetración en ddm.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 7. Valores de Punto de ablandamiento en °C.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 8. Valores de Recuperación elásticas por torsión en %</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 9. Valores de Ductilidad en cm</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 10. Temperaturas de Compactación y Mezclado en °C.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 11. Grado de desempeño</i>	<i>57</i>

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
<i>Fotografía 1. Torre de oxidación, planta MPI Barrancabermeja.....</i>	<i>4</i>
<i>Fotografía 2. LDPE, (a) antes y (b) después de la molienda</i>	<i>16</i>
<i>Fotografía 3. Tamizado del LDPE</i>	<i>17</i>
<i>Fotografía 4. Proceso de modificación de asfalto con LDPE.....</i>	<i>21</i>
<i>Fotografía 5. Referenciación de muestras de ligante modificado con LDPE</i>	<i>22</i>
<i>Fotografía 6. Ensayo de Penetración, (a) Moldes para las muestras, (b) Penetrómetro</i>	<i>23</i>
<i>Fotografía 7. Montaje Aparato de anillo y bola</i>	<i>25</i>
<i>Fotografía 8. Fotografía de recuperación elástica por torsión.....</i>	<i>27</i>
<i>Fotografía 9. (a) Ductilómetro, (b) ensayo del ligante modificado con 3% de LDPE modificado a 60 minutos</i>	<i>29</i>
<i>Fotografía 10. Viscosímetro rotacional</i>	<i>30</i>
<i>Fotografía 11. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT), (a) botellas con muestra (b) Equipo RTFOT.....</i>	<i>33</i>
<i>Fotografía 12. Acondicionamiento de cemento asfáltico en Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV), (a) bandejas con muestra, (b) Equipo PAV</i>	<i>34</i>
<i>Fotografía 13. Ensayo de caracterización del comportamiento visco-elástico con DSR, (a) muestras, (b) Equipo DSR</i>	<i>36</i>

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Resultados de los ensayos de penetración

ANEXO B – Resultados de los ensayos de punto de ablandamiento en agua

ANEXO C – Resultados de los ensayos de Ductilidad

ANEXO D – Resultados de los ensayos de Recuperación elástica por torsión

ANEXO E – Cuervas reológicas

ANEXO F – Tabla resumen de ensayos

1 MARCO CONCEPTUAL

1.1 ASFALTO

El asfalto es un material viscoso de alta cohesión, impermeable y adherente, de color negro, producto de los hidrocarburos solubles en sulfuro de carbono, el cual puede ser de origen natural o ser el residuo del tratamiento que se le hace a algunos crudos de petróleo en los procesos de extracción o destilación (HUANG Y.H., 2004); dentro de sus múltiples usos está la elaboración de concretos asfálticos, la impermeabilización de cubiertas, y el ligado de materiales o capas que contiene la estructura de un pavimento (ARENAS H., 2006).

La mayoría de los asfaltos provienen de la destilación del crudo de petróleo, proceso que se realiza a elevadas temperaturas (Figura 1); este proceso es conocido como destilación primaria, en la que se presenta la formación de gases, líquidos y residuos que pasan por una columna fraccionada donde los líquidos y residuos son almacenados en el fondo de la columna y los gases condensados y enfriados para convertirse en productos finales como la gasolina, el kerosene , entre otros (Figura 2). Los líquidos y residuos son destilados al vacío dentro de la columna fraccionada; esta destilación consiste principalmente en bajar la presión en la columna para separar los materiales, ya que las fracciones pesadas sometidas a vacío hierven a una menor temperatura de lo que lo harían a la presión atmosférica. Dependiendo de la cantidad de vacío que se genere en la

columna, se obtendrá un mayor número de tipos de asfalto que serán utilizados como cementos asfálticos.

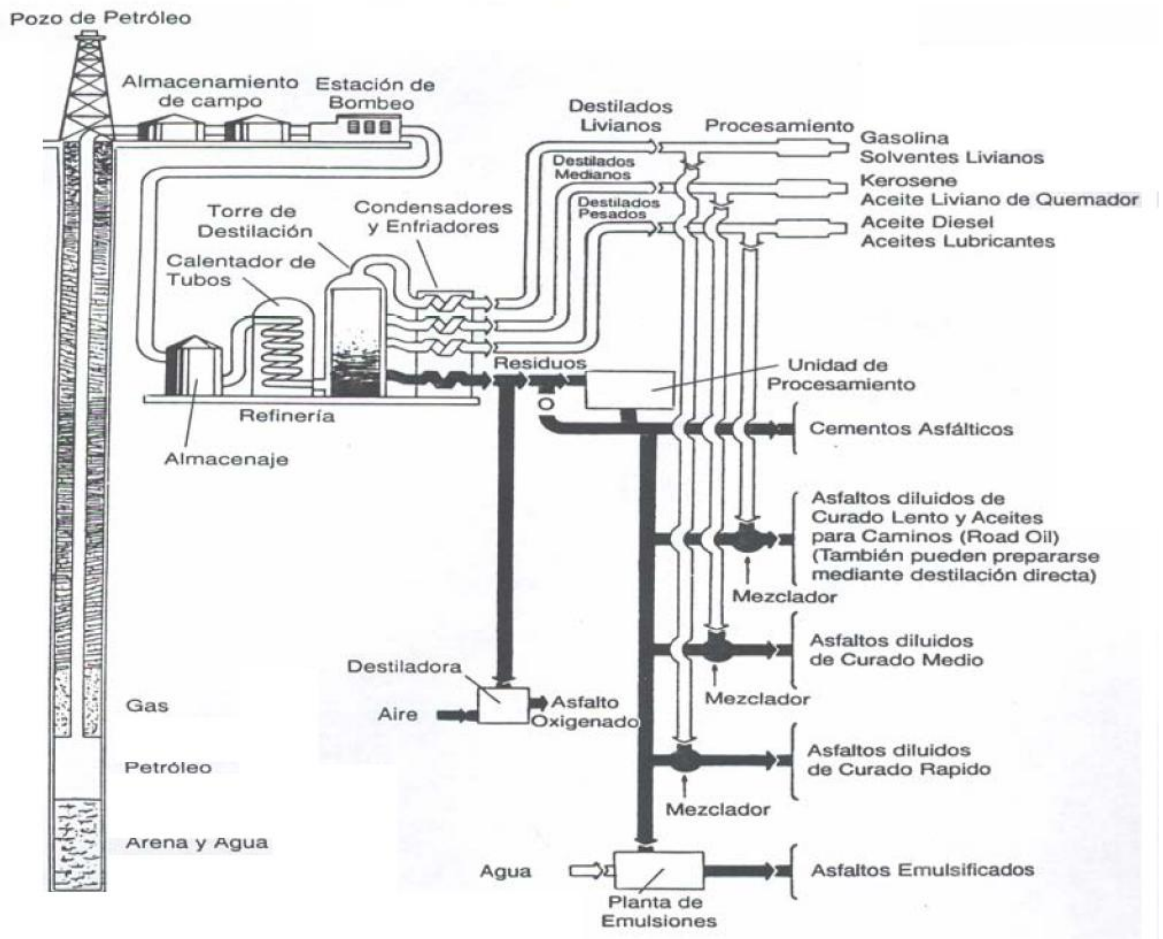


Figura 1. Diagrama de flujo para asfalto de petróleo

(Fuente: Manual del Asfalto, Instituto del asfalto, 1962)

El asfalto se puede presentar en estado sólido, semisólido y líquido, dependiendo de la temperatura a la que se encuentre; los asfaltos son ampliamente utilizados

en la construcción y mantenimiento de vías y carreteras para la conformación de capas flexibles, en las cuales funciona como ligante entre los agregados pétreos.

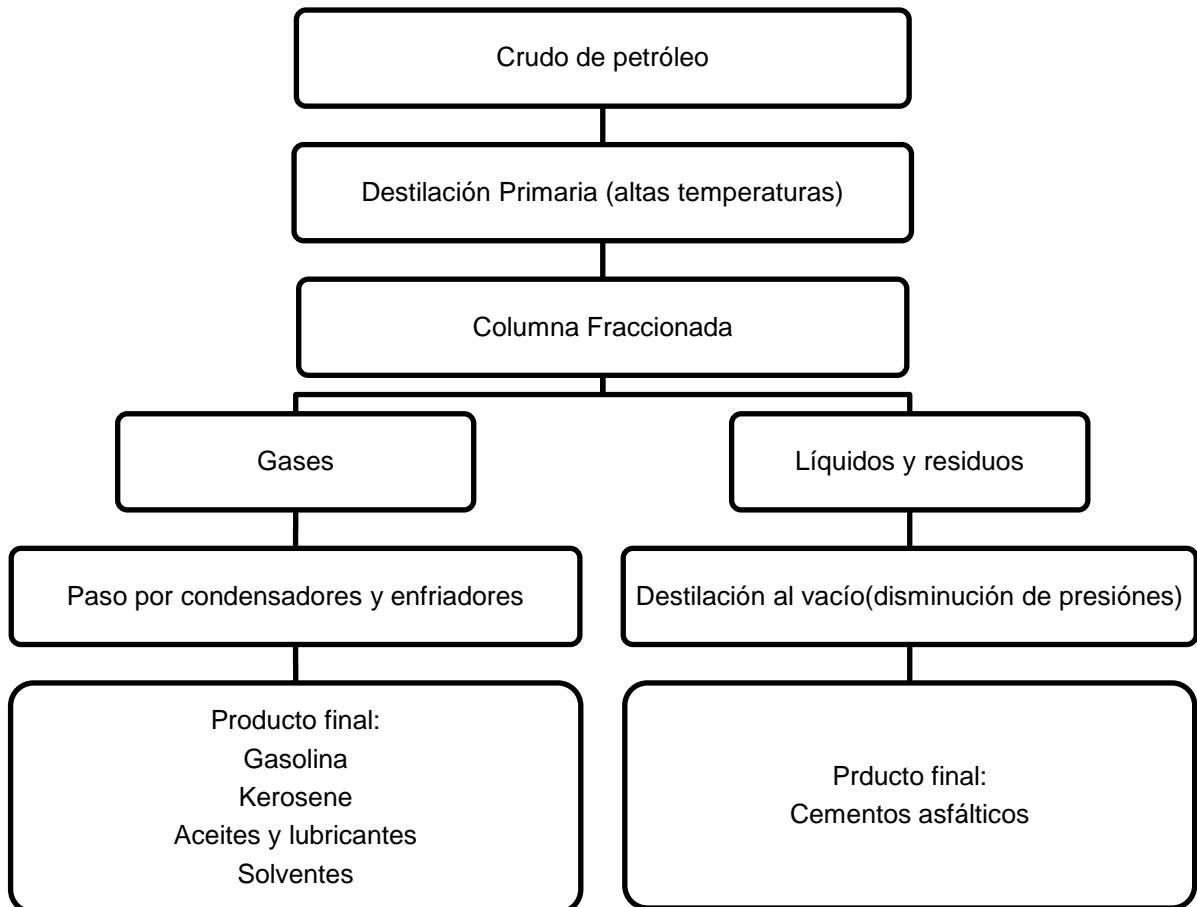


Figura 2. Esquema proceso de destilación del petróleo

1.1.1 Asfalto normalizado

Un asfalto normalizado es aquel que se somete a un proceso de oxidación muy breve en una torre de oxidación, con el objeto de lograr ajustar su penetración

según los requerimientos que para éste se exijan, y puedan ser utilizados en aplicaciones específicas o dónde los requerimientos técnicos lo demanden. En el proceso de normalización, el asfalto es introducido en una torre de oxidación (Fotografía 1), donde se somete a elevadas temperaturas y corrientes de aire, con el objeto de endurecerlo por oxidación; éste proceso de oxidación produce en los asfaltos un aumento de su peso específico, de la viscosidad, y de la penetración.



Fotografía 1. Torre de oxidación, planta MPI Barrancabermeja

1.2 MODIFICACIÓN DE ASFALTOS

Alrededor del mundo se han llevado a cabo estudios en los que el cemento asfáltico modificado ha presentado mejoras en sus propiedades físicas, sobre todo aquellos modificados con polímeros, en los cuales se ha demostrado que: aumenta la consistencia, disminuye la temperatura de ablandamiento, mejoras sus características reológicas y recupera en un mayor porcentaje su forma cuando es sometido a deformaciones. Estas modificaciones en los ligantes mejoran las características mecánicas de las mezclas asfálticas como son: mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento, menor susceptibilidad térmica, entre otras. Una de las principales características es que las mezclas con asfaltos modificados presentan una mejora en el grado de cohesión entre los agregados y el cemento asfáltico ante la presencia del agua de lluvias y escorrentías. A altas temperaturas los asfaltos modificados presentan altos valores de rigidez, y esto a su vez hace que se disminuya la deformación plástica o ahuellamiento; y cuando está a bajas temperaturas se comporta mejor ante la aparición de fisuras comparado con una mezcla con asfalto convencional. Cuando se habla de modificar cementos asfálticos, se está haciendo referencia a la interacción física y/o química que se puede llegar a tener entre el ligante y el modificador.

1.2.1 Cementos asfálticos modificados con polímeros

La búsqueda por innovar y generar productos competentes en el campo de la construcción de pavimentos ha sido un reto importante para el ingeniero de vías, buscando siempre un modificador que se fusione con el cemento asfáltico de una

manera adecuada, y presente un buen comportamiento durante los procesos de mezclado, enfriamiento, y almacenamiento, y cumpla además con lo que se busca dentro de la mezcla asfáltica que contiene el ligante modificado. Un asfalto modificado con polímeros presentará una mayor viscosidad (en función de la cantidad de polímero adicionado), experimentará un aumento en la resistencia antes los efectos del agua y mayor resistencia al envejecimiento, menor susceptibilidad a la variación de las temperaturas, y un incremento en el punto de inflamación entre otras. Todas estas mejoras dependen del tipo de asfalto que se tenga de base y del tipo y cantidad de polímero con que éste se modifique (HUANG Y. *et al.*, 2007).

El Instituto Nacional de Vías, en el artículo 400–07 “*Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos*”, presenta las denominaciones y características básicas para los cementos asfálticos modificados con polímeros (Tabla 1). En este artículo, los cementos asfálticos convencionales modificados con EVA o polietileno son clasificados como Tipo I, y se emplearán en la elaboración de mezclas de tipo drenante; los Tipos II, III y IV se refieren a cementos asfálticos convencionales modificados con copolímeros de bloque estirénico como el SBS.

Tabla 1. Especificaciones de cementos asfálticos modificados con polímeros

Característica	Unidad	Norma de Ensayo INV	Tipo I		Tipo II		Tipo III		Tipo IV		Tipo V	
			Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Asfalto Original												
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	55	70	55	70	55	70	80	130	15	40
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	E-712	58	-	58	-	65	-	60	-	65	-
Ductilidad (5°C, 5 cm/min)	Cm	E-702	-	-	15	-	15	-	30	-	-	-
Recuperación elástica por torsión a 25°C	%	E-727	15	-	40	-	70	-	70	-	15	-
Estabilidad al almacenamiento (*) Diferencia en el punto de ablandamiento	°C	E-726 y E-712	-	5	-	5	-	5	-	5	-	5
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2	-	0.2
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland	°C	E-709	230	-	230	-	230	-	230	-	230	-
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (INV E-720)												
Pérdida de masa	%	E-720	-	1	-	1	-	1	-	1	-	1
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento, % de la penetración original		E-706	65	-	65	-	65	-	60	-	70	-
Ductilidad	Cm	E-702	-	-	8	-	8	-	15	-	-	-

(Fuente: Tabla 400.4 del Artículo 400-07, Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos, Invías, 2007)

1.2.2 Experiencia colombiana en el uso de asfaltos modificados con polímeros

En Colombia se han adelantado investigaciones referentes a la modificación de cementos asfálticos con diversos polímeros, entre los que se encuentran el caucho molido proveniente de llantas usadas, las bolsas de leche, y el icopor (REYES F. y FIGUEROA A.S., 2008), con los que se han obtenido resultados satisfactorios como es el mitigar la deformación plástica en el pavimento y que adicionando polvo de llanta se puede mejorar la susceptibilidad ante la fatiga; sin embargo, y con el ánimo de estudiar el uso de nuevos materiales alternativos, actualmente se están investigando nuevas propuestas que involucren otros desechos que permitan mejorar el comportamiento y las propiedades físicas de los ligantes.

1.3 POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)

El polietileno de baja densidad (LDPE) es un polímero o termoplástico proveniente de procesos de polimerización de etileno gaseoso donde se somete a altas presiones y temperaturas. Su densidad varía entre 0.915 y 0.925 g/cm³, y por ser un material que contiene gran cantidad de cadenas de etileno (Figura 4) se diferencia del polietileno de media y de alta densidad (HäFELE M. et al., 2006), haciendo de este un material empleado para diferentes usos (p. ej. sacos y bolsas plásticas, mantos plástico utilizadas en invernaderos, juguetes, entre otros). Por ser este un material reciclable, es importante concientizar a las personas para que

este proceso se cumpla y pueda dársele el manejo adecuado, ya que la contaminación que éste genera afecta notablemente las ciudades. Para reciclar el LDPE, éste se debe identificar por medio de su código el cual, de acuerdo con la Society of the PlasticIndustry, el LDPE se identifica con el símbolo 4 PEBD (Figura 3). Dentro de las principales características del LDPE están que no es toxico, es flexible, liviano, transparente, impermeable y de bajo costo.



Figura 3. Símbolo de identificación para el Polietileno de baja densidad

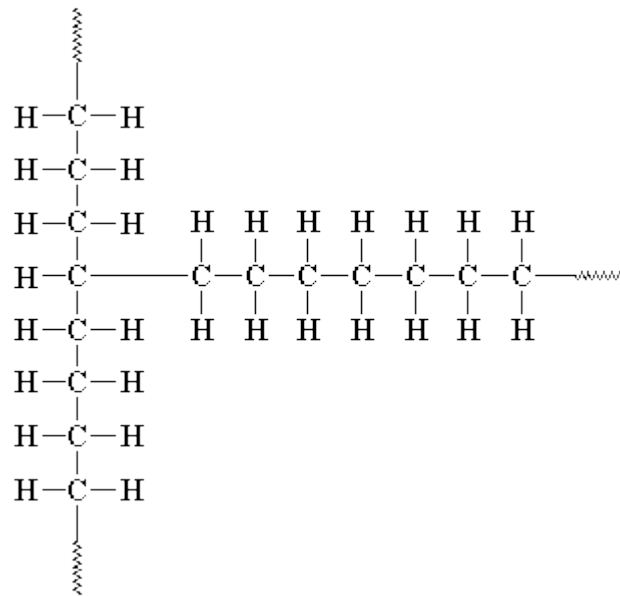


Figura 4. Cadena ramificada del Polietileno de baja densidad

1.4 Especificaciones Superpave para ligantes asfálticos

Estas nuevas especificaciones han sido implementadas para controlar algunas propiedades físicas del asfalto, para que éste, como componente de un pavimento, ayude a controlar las propiedades mecánicas como de formación permanente, fisuración por fatiga y fisuración por bajas temperaturas (IPC, 1996).

1.4.1 Deformación permanente

La deformación permanente es un fenómeno que ocurre en los pavimentos cuando éstos se encuentran a altas temperaturas. La especificación Superpave

contempla valores que son requisito como factor determinante de esta forma de falla. El factor de determinante para el ahuellamiento es el resultado de dividir G^* entre $\sin \delta$, y debe ser mayor a 1 kPa para ligantes asfálticos sin envejecer, y mínimo 2.20 kPa para los asfaltos envejecido en el horno de lámina delgada. Entre mayor sea el valor de $G^* / \sin \delta$, el material tendrá un comportamiento más cercano al de un sólido elástico, y esto favorecerá la resistencia que éste pueda presentar ante el ahuellamiento (IPC, 1996).

1.4.2 Fisuración por fatiga

Los parámetros G^* y (δ) se emplean también en estas nuevas especificaciones para controlar y evitar la fisuración por fatiga en pavimentos flexibles. Para analizar este fenómeno es necesario realizar los ensayos de RTFO y PAV, ya que éste fenómeno es un tipo de falla que se presenta a temperaturas moderadas y bajas en la vida útil del pavimento. Para este tipo de falla se analizan los valores que se tengan del factor de agrietamiento por fatiga, el cual es el resultado de la multiplicación de G^* y $\sin \delta$. Según las especificaciones Superpave, el factor de agrietamiento por fatiga debe ser máximo 5000 kPa para ligantes. Entre menor sea el valor de $G^* \cdot \sin \delta$, mayor será la capacidad del material para recobrar su forma original luego de deflexiones repetidas; siendo ésta una característica que se desea para evitar que el pavimento se agriete por fatiga (IPC, 1996).

1.4.3 Grado de desempeño de un ligante

El Grado de Desempeño de un ligante PG (Performance Graded) es un parámetro utilizado para determinar el desempeño de un ligante. Éste parámetro fue propuesto inicialmente por el Strategic Highway Research Program (SHRP) a principio de los años noventa.

El objetivo principal en la clasificación y selección de ligantes usando el sistema PG es asegurarse de que el ligante utilizado en una mezcla asfáltica tenga las propiedades adecuadas para desempeñarse apropiadamente en un ambiente determinado (IPC, 1996). La clasificación PG emplea diversas mediciones de las propiedades de flujo del ligante para establecer su grado de desempeño, el cual se expresa con dos números que hacen referencia a las temperaturas máxima y mínima de desempeño.

En la Tabla 2 se presentan las especificaciones y los requisitos propuestos por Superpave para conocer el grado de desempeño de los cementos asfálticos.

Tabla 2. Especificaciones para clasificación del grado de desempeño de cementos asfálticos

Grado de Desempeño	PG 46			PG 52						PG 58					PG 64					PG 70					PG 76				PG 82															
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34							
Max. Temp. De Diseño del Pavimento (promedio de 7 días), °C	< 46			< 52						< 58					< 64					< 70					< 76				< 82															
Min. Temp. de Diseño del Pavimento, °C	>34	>40	>46	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>46	>16	>22	>28	>34	>40	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>10	>16	>22	>28	>34	>40	>10	>16	>22	>28	>34	>10	>16	>22	>28	>34							
Ligante Original																																												
Punto de Inflamación, T48: min, °C	230																																											
Viscosidad, ASTM D 4402; Máx, 3 Pa-s (3000 cP) Temp. De Ensayo, °C	135																																											
Corte Dinámico, TP5: G ⁺ /senδ, min., 1.00 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	46			52						58					64					70					76				82															
Residuo de RTFO (T 240) o TFO (T 179)																																												
Pérdida de Masa, máx., %	1.00																																											
Corte Dinámico, TP5: G ⁺ /senδ, min., 2.20 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	46			52						58					64					70					76				82															
Residuo de PAV (PP1)																																												
Temperatura del PAV, °C	90			90						100					100					100 (110)					100 (110)				100 (110)															
Corte Dinámico, TP5: G ⁺ /senδ, máx., 5000 kPa Temp. de Ensayo @ 10 rad/seg, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Informe																																												
Endurecimiento Físico	Informe																																											
Rigidez en Creep, TP1: S, máx., 300 Mpa valor-m, min., 0.3000 Temp. de Ensayo @ 60 seg, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24							
Tracción Directa, TP3: Def. Específ. de falla, min., 1.0% Temp. de Ensayo @ 1.0 mm/mm, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24							

(Fuente: Anexo A, Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE, Instituto Panamericano de carreteras, 1996)

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento asfáltico

El cemento asfáltico utilizado fue un asfalto normalizado 60/70, de Barrancabermeja, el cual fue suministrado por la empresa MPI Bitumen y la planta Mario Huertas Cotes, ubicada en la autopista Medellín – Alto del Vino. Este asfalto fue normalizado en la torre de oxidación de la planta de MPI en Barrancabermeja (Fotografía 1), debido a que el asfalto que provee Ecopetrol (única empresa que suministrar el asfalto en el país) se encuentra en la mayoría de los casos fuera de la normativa de penetración.

Un asfalto normalizado 60/70 es aquel que somete a un proceso de oxidación muy breve en una torre para este fin, con el objeto de lograr ajustar su penetración entre 60 dmm y 70 dmm. El asfalto normalizado 60/70 es uno de los asfaltos más utilizados en las obras viales del país.

Tabla 3. Especificaciones de Asfalto Normalizado 60/70

Propiedad	Unidad	Min	Max
Penetración	dmm	60	70
Índice de penetración		-1	+1
Viscosidad Dinámica	Poises	1500	-
Pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento, RTOFT	%	-	1.0
Ductilidad @ 25 °C 5 cm/min	Cm	100	-
Punto de chispa	°C	230	-
Solubilidad de Tricloroetileno	%	99	
Contenido de agua	%	-	0.2
Penetración del residuo después de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original	%	52	-
Incremento del punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento	°C	-	9

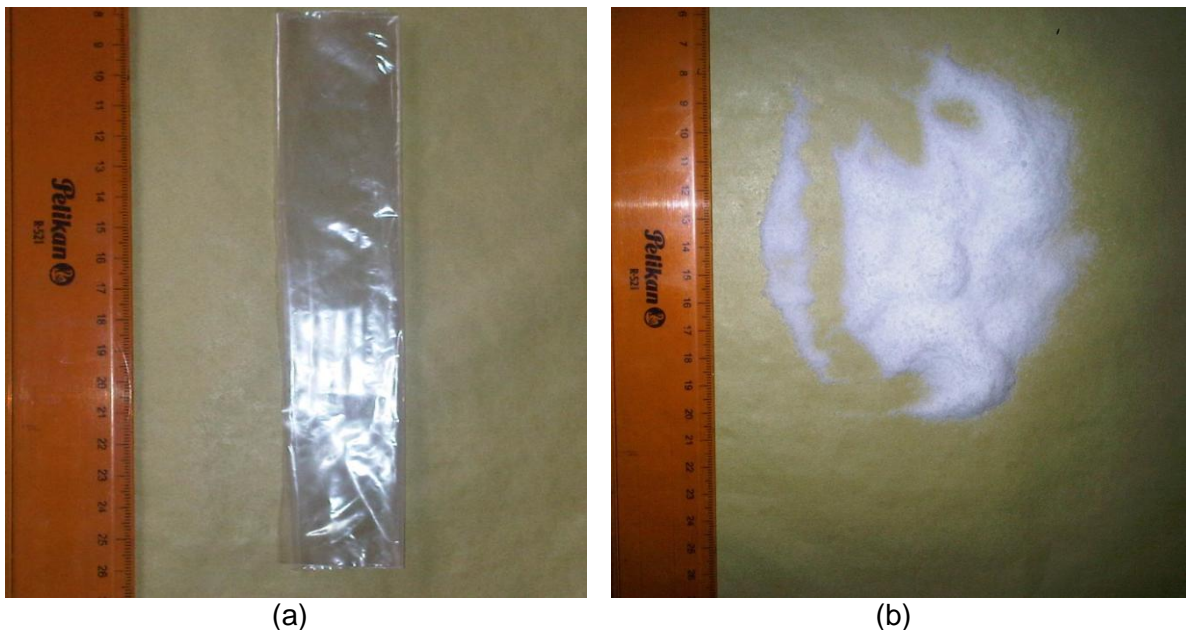
(Fuente: Empresa MPI Bitumen LTDA)

2.1.2 Polietileno de baja densidad

El polietileno de baja densidad, con el que se trabajó en el proyecto, fue suministrado por la empresa Propilene Ltda., la cual se dedica a fabricar una amplia gama de productos a base de polímeros en la ciudad de Bogotá. En la Tabla 4 se presentan las principales características de este material. Para la modificación del cemento asfáltico se buscó que el polietileno de baja densidad se encontrara libre de contaminación (p. ej. materia orgánica y otros elementos), y que sus partículas fueran lo más finas posibles para una mejor reacción con el ligante. El material fue proporcionado en tiras de polietileno, resultantes de los

residuos de la fabricación de film o mantos plásticos para invernaderos. Actualmente, este residuo se está reutilizando en la fabricación de elementos plásticos con mayor densidad (p. ej. sillas plástica, botes de basura, utensilios, entre otros); sin embargo, dentro de este proceso de reutilización se requiere un alto consumo de recursos, que resulta en un producto final relativamente más costoso que si se utilizara materia prima no reciclada. Por el contrario, al reutilizar desechos de polietileno de baja densidad en la modificación de ligantes, lo único que se requiere de éste producto es que no se encuentre contaminado, y presente un adecuado tamaño de partículas para ser mezclado de la manera más homogénea posible con el asfalto.

El polietileno de baja densidad que se presenta en la Fotografía 2a, fue sometido a un proceso de molienda con el fin de reducirlo a su menor expresión y garantizar su fácil mezclado con el ligante.



Fotografía 2. LDPE, (a) antes y (b) después de la molienda

Tabla 4. Especificaciones de Polietileno de baja densidad

Característica	Unidad	Rango
Densidad a 23°C	g/cm ³	0.9195 - 0.235
Punto de Fusión	°C	105 – 110
Índice de Fusión	g/ 10 min	1.7 – 2.30
Resistencia última	PSI	1900 – 2741
Elongación última	%	319 -534

(Fuente: Empresa Propilene LTDA)

Luego de llevar el LDPE a la fracción más fina posible en la molienda, fue sometido a un proceso de tamizado (Fotografía 3) para conocer cuál era la gradación que presentaba.



Fotografía 3. Tamizado del LDPE

En la Tabla 5 se presenta la distribución granulométrica del polietileno de baja densidad utilizado en la modificación del ligante.

Tabla 5. Gradación del LDPE utilizado en la modificación del ligante

Tamiz		Porcentaje retenido
(mm)	(pulg)	(%)
2.0	No. 10	0.077
0.425	No. 40	55.998
0.150	No. 100	40.990
0.075	No. 200	2.608
FONDO		0.206

2.2 Diseño de muestras

Para la modificación del ligante con polietileno de baja densidad, se contempló como parámetros variables el porcentaje de adición de LDPE y el tiempo de reacción, y como parámetros constantes la temperatura de mezclado y la frecuencia de giro del brazo en el mezclador. Este diseño experimental condujo a la fabricación de veintidós (22) muestras, las cuales surgieron de la siguiente combinación:

- Un (1) tipo de cemento asfáltico sin modificar de producción nacional normalizado, de penetración 60/70 de Barrancabermeja.
 - Siete (7) porcentajes de adición del LDPE en peso con relación a la cantidad de cemento asfáltico: 1%,2%,3%,4%, 5%, 6% y 7%.
-

- Tres (3) tiempos de reacción del ligante con el LDPE: 30min, 60 min y 90 min.
- Una temperatura de mezcla a 150 °C.
- Una velocidad de mezclado 6000 rpm.

Con el objeto de analizar el cambio en la calidad del ligante modificado, las mezclas se analizaron teniendo como base los requerimientos del INVIAS para asfaltos modificados con polímeros como se mencionó en el aparte 1.2.1. De acuerdo con Caseey *et al.* (2008), un asfalto de penetración de 160 dmm requirió un porcentaje óptimo de adición de LDPE de 4% para su modificación. Dado que para este estudio se modificó un asfalto de penetración 60/70, fue necesario realizar un barrido con diferentes porcentajes de polietileno de baja densidad, combinados con tres tiempos de reacción, que permitieran identificar, por medio de ensayos de caracterización, las condiciones óptimas de modificación.

Con el objeto de limitar el alcance de la investigación, se decidió mantener un valor constante la temperatura de reacción en 150 °C; se escogió esta temperatura ya que el punto de fusión del polietileno de baja densidad es del orden de 110 °C, y por otro lado, para no alterar significativamente las propiedades del ligante, se recomienda no calentarlo a temperaturas por encima de 190 °C. Así entonces, la temperatura seleccionada correspondió a un valor medio que permitiera la reacción entre el ligante y el LDPE sin afectar estos dos materiales.

2.3 Modificación de ligante asfáltico con LDPE

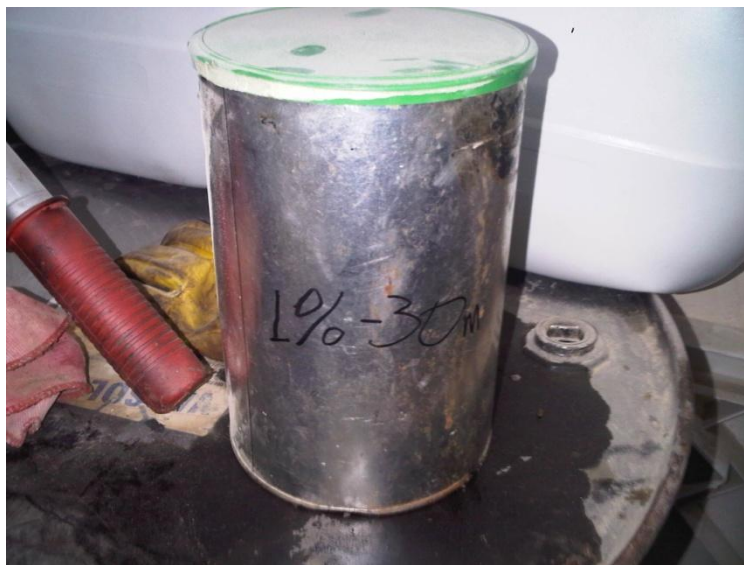
En la Fotografía 4 se presenta el proceso de modificación del cemento asfáltico con el polietileno de baja densidad. Este se realizó utilizando un equipo homogeneizador de asfaltos, IKA HB4-Basic, el cual consta de un brazo que gira entre 500 rpm y 10000 rpm, según se requiera para el proceso de modificación. La experiencia obtenida en el laboratorio para la modificación de ligantes con polímeros utilizando este equipo indica que ésta se debe realizar entre 4000 rpm y 8000 rpm, por lo que para esta investigación se escogió una velocidad de mezclado de 6000 rpm.

El proceso de modificación del cemento asfáltico con polietileno de baja densidad consistió en calentar el asfalto hasta una temperatura de 150 °C; una vez la muestra de asfalto se estabilizaba a ésta temperatura, se proseguía a adicionar lentamente la cantidad requerida de LDPE, dependiendo del porcentaje con el que se iba a modificar el ligante. Para determinar la cantidad de LDPE, se pesaba previamente el asfalto a modificar, y basándose en este peso se calculaba el peso de LDPE a adicionar. El LDPE se adicionaba en su totalidad en un periodo máximo de un minuto, con el brazo girando a 500 rpm; esto con el fin de estabilizar la mezcla y dejarla libre de grumos del polímero. Una vez homogenizada la mezcla ligante-LDPE, se ajustaba la frecuencia de mezclado a 6000 rpm, y se mantenía constante durante los tiempos de reacción estimados, los cuales fueron de 30, 60 y 90 minutos.



Fotografía 4. Proceso de modificación de asfalto con LDPE

Cuando el proceso cumplía con el tiempo requerido para cada mezcla, se dejaba enfriar la muestra hasta los 100 °C aproximadamente, y se vertía en los recipientes de $\frac{1}{4}$ de galón, los cuales se rotularon con la referencia del porcentaje de adición y tiempo de reacción (Fotografía 5). Estas muestras se almacenaban en un cuarto con condiciones apropiadas, y sólo se volvían a calentar al momento de realizar los ensayos de caracterización.



Fotografía 5. Referenciación de muestras de ligante modificado con LDPE

2.4 Evaluación de las propiedades físicas

Los ensayos que se practicaron a cada una de las muestras, son los necesarios para verificar las condiciones que para un asfalto modificado con polímeros se indican en la Tabla 400.4 del Artículo 400-07 del Invías (Tabla 1), y son los que se presentan a continuación.

2.4.1 Penetración de los materiales asfálticos

La medida de la penetración en asfaltos sirve para determinar la consistencia de los materiales asfálticos sólidos o semisólidos donde el componente principal es el asfalto. La penetración se define como la distancia, expresada en décimas de

milímetro (dmm) hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Como se observa en la Fotografía 6, los moldes que se llenan con el asfalto a ensayar se ubican debajo de la aguja que sostiene el Penetrómetro. Normalmente, el ensayo se realiza a 25 °C durante un tiempo de 5 segundos y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100 g. La norma de ensayo que se siguió para determinar la penetración fue la INV E-706-07 (Invías, 2007f).



(a)



(b)

Fotografía 6. Ensayo de Penetración, (a) Moldes para las muestras, (b) Penetrómetro

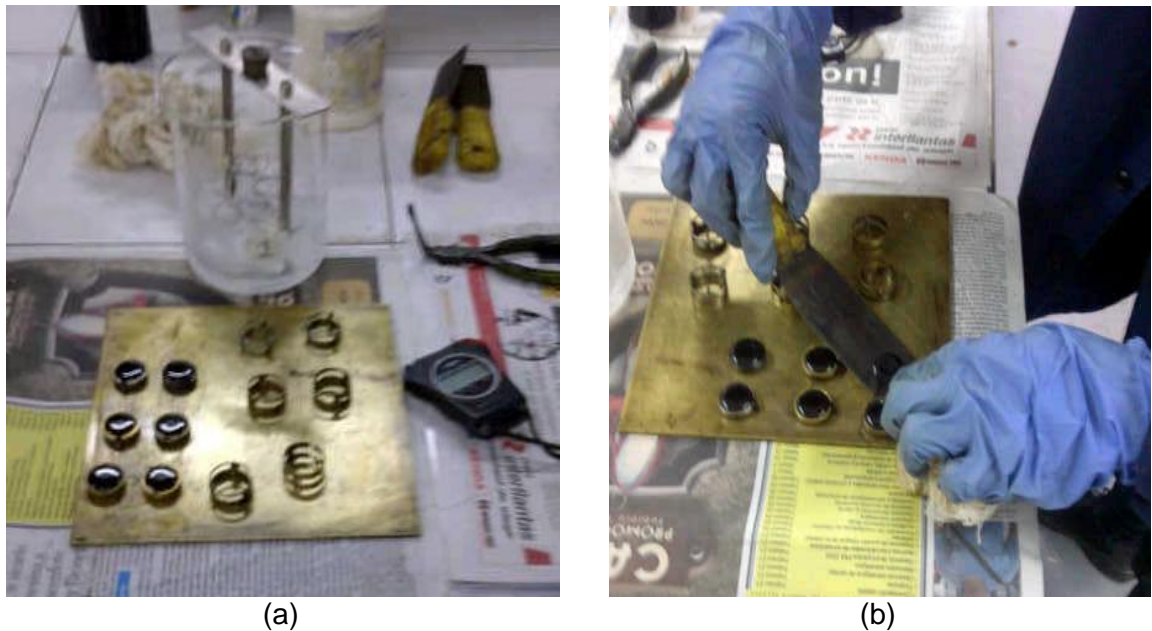
En la Tabla 6 se presentan los resultados del ensayo de Penetración para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. Estos resultados se analizan en el aparte 3.1.

Tabla 6. Valores de Penetración en ddm

% LDPE	Tiempos de reacción		
	30 min	60 min	90 min
0		68	
1	67	66	60
2	64	63	53
3	60	55	50
4	58	53	44
5	57	48	39
6	56	47	39
7	54	47	37

2.4.2 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)

Esta prueba se utiliza para determinar la temperatura en la que el ligante asfáltico tiende a fluir cuando es sometido a altas temperaturas. Los materiales bituminosos no cambian del estado sólido al estado líquido a una cierta temperatura, sino que a medida que aumenta la temperatura se vuelven más blandos; es por esta razón que, por medio de esta prueba de laboratorio, se debe establecer la temperatura a la cual el material fluye, simulando un aumento gradual de temperatura. El ensayo consiste en llenar un anillo con asfalto (Fotografía 7a), y sobre éste colocar una esfera de 3.5 g. Dependiendo de la modalidad del ensayo, la muestra se encuentra inmersa dentro de agua, glicerina USP, o glicol etileno, a una temperatura estabilizada de 5 °C. Cuando el montaje esté listo y lleve cierto tiempo, se calienta gradualmente y se registra la temperatura en el momento en que el asfalto que rodea la esfera toque el fondo del plato base a una distancia vertical de 25 mm. La norma de ensayo que se siguió para determinar el punto de ablandamiento fue la INV E-712-07 (Invías, 2007g).



Fotografía 7. Montaje Aparato de anillo y bola

En la Tabla 7 se presentan los resultados del ensayo de Punto de ablandamiento para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. Estos resultados se analizan en el aparte 3.1.

Tabla 7. Valores de Punto de ablandamiento en °C

% LDPE	Tiempos de reacción		
	30 min	60 min	90 min
0		51.0	
1	55.0	56.0	58.0
2	56.0	58.0	58.0
3	58.0	60.0	58.5
4	60.0	63.0	62.0
5	64.5	68.0	70.0
6	65.0	68.0	71.0
7	68.0	70.0	71.5

2.4.3 Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados

El objetivo de esta prueba es medir la capacidad que tiene un asfalto para recuperarse después de ser sometido a una deformación. El ensayo se efectúa sobre asfaltos modificados con polímeros, y consiste en aplicar un esfuerzo de torsión a una muestra de asfalto cilíndrica contenida en un molde con especificaciones conocidas y a una temperatura de 25°C. Durante el ensayo, la torsión es aplicada a la muestra por medio de un cilindro que se gira 180°, una vez este es liberado, se determina el ángulo recuperado por el cemento asfáltico pasados 30 minutos. La recuperación elástica torsional, *Ret*, puede ser expresada como porcentaje dividiendo el ángulo recuperado entre 180° y multiplicándolo por 100 (Ecuación 1).

$$Ret(\%) = \frac{L}{180^\circ} * 100$$

Ecuación 1

En la Fotografía 8 se presenta el montaje del ensayo de recuperación elástica por torsión, el cual sólo se practicó sobre las muestras del ligante modificado con polietileno de baja densidad. La norma de ensayo que se siguió para determinar la recuperación elástica por torsión fue la INV E-727-07 (Invías, 2007h).



(a)



(b)

Fotografía 8. Fotografía de recuperación elástica por torsión

En la Tabla 8 se presentan los resultados del ensayo de Recuperación elástica por torsión para los ligantes modificados. Estos resultados se analizan en el aparte 3.1.

Tabla 8. Valores de Recuperación elásticas por torsión en %

% LDPE	Tiempos de reacción		
	30 min	60 min	90 min
1	2.11	1.11	1.11
2	3.78	2.67	2.34
3	4.33	4.43	4.11
4	6.78	6.76	6.09
5	12.04	9.33	8.98
6	15.56	13.33	14.44
7	21.11	16.66	20.00

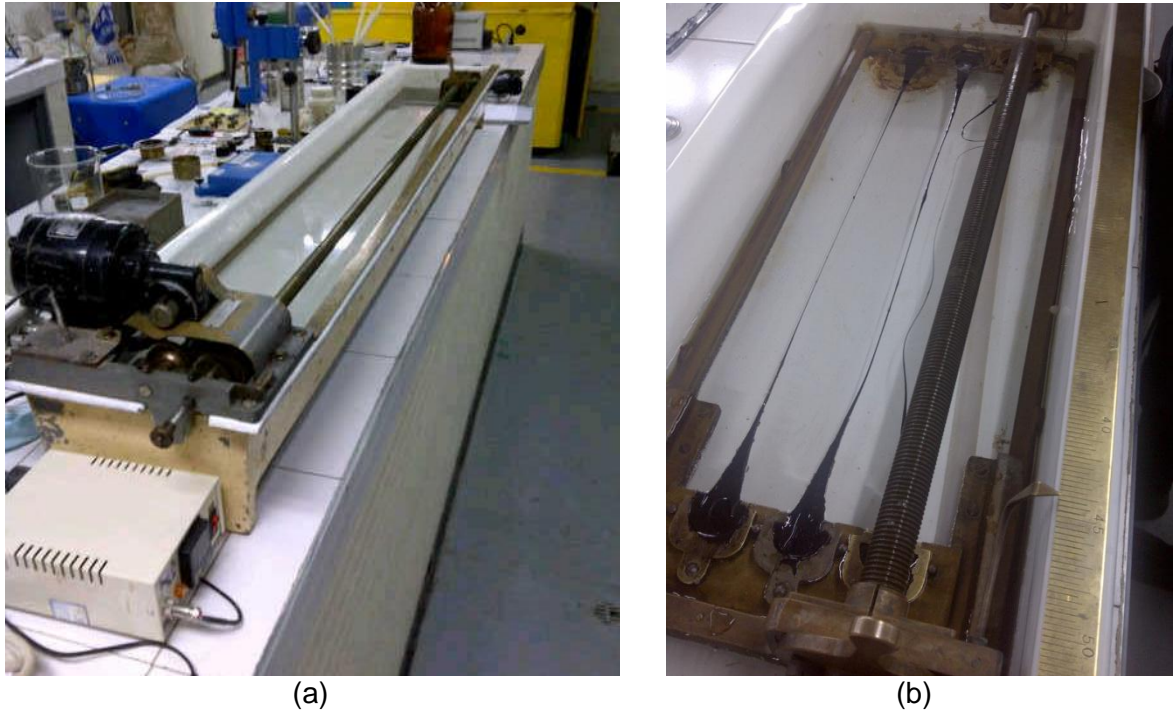
2.4.4 Ductilidad de los materiales asfálticos

La ductilidad es la propiedad que mide cuánto es capaz de elongarse una muestra de asfalto antes de que sufra una ruptura. Durante el ensayo, la muestra es sumergida en agua y es mantenida una temperatura constante de 25 °C. El ductilómetro (Fotografía 9), que es el instrumento utilizado, se extiende con una velocidad de tracción controlada constante de 5 cm/min. La muestra de asfalto se estira hasta que el hilo sufre la ruptura, instante en el cual se mide la longitud de elongación. Esta medida en centímetros se denominada ductilidad del asfalto. La norma de ensayo que se siguió para determinar la ductilidad fue la INV E-702-07 (Invías, 2007a).

En la Tabla 9 se presentan los resultados del ensayo de Ductilidad para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. Estos resultados se analizan en el aparte 3.3.

Tabla 9. Valores de Ductilidad en cm

% LDPE	Tiempos de reacción		
	30 min	60 min	90 min
0		125	
1	125	125	125
2	85	125	125
3	80	95	117
4	66	86	100
5	35	40	35
6	35	35	35
7	30	35	30

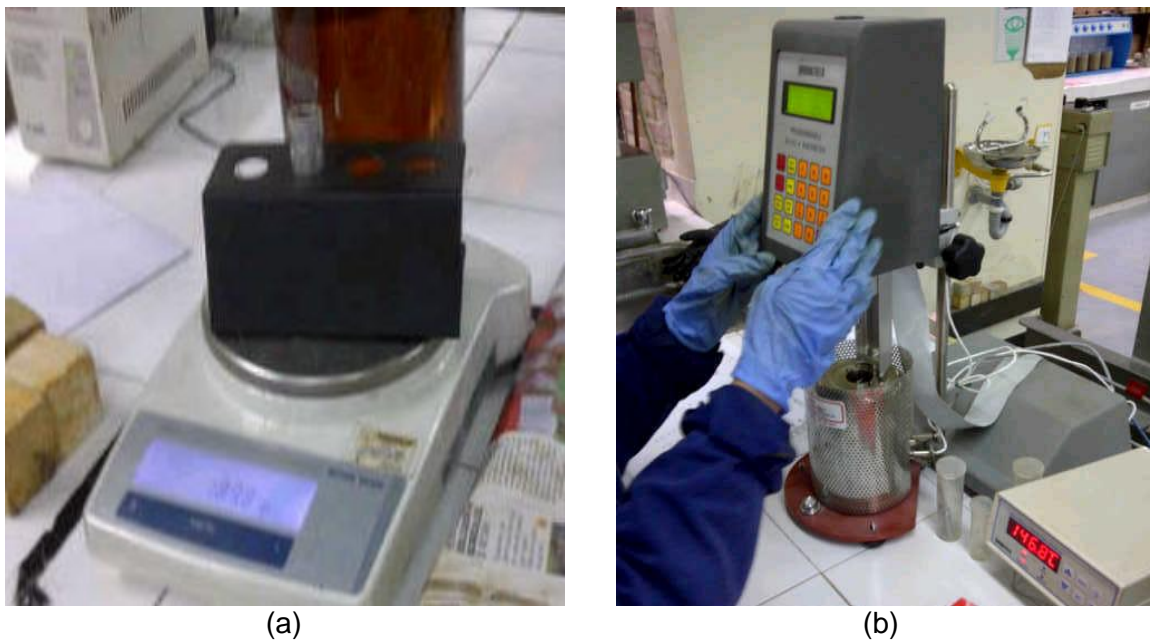


Fotografía 9. (a) Ductilómetro, (b) ensayo del ligante modificado con 3% de LDPE modificado a 60 minutos

2.4.5 Viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional

El objetivo del ensayo es medir la viscosidad aparente del asfalto a elevadas temperaturas, desde 60° a 200°C, usando un viscosímetro rotacional equipado con una celda térmica. Los resultados del ensayo son útiles para determinar las temperaturas de mezclado y de compactación para una mezcla asfáltica. El equipo utilizado fue un viscosímetro Brookfield DV-III. Para el ensayo, el asfalto es vertido en pequeños tubos, los que a su vez son introducidos dentro de la cámara térmica. El equipo se programa con la temperatura y las revoluciones requeridas para el ensayo. Se deja que la muestra de asfalto alcance la temperatura deseada por un periodo mínimo de 10 minutos, se inicia la rotación de la aguja por 10

minutos a la temperatura de ensayo, y se registra la medida de viscosidad emitida por el equipo. Si durante el ensayo el material no opone resistencia al giro de la aguja, se debe cambiar la aguja por otra adecuada y reprogramar la velocidad de giro. La norma de ensayo que se siguió para determinar las viscosidades a las diferentes temperaturas fue la INV E-717-07 (Invías, 2007e). En la Fotografía 10a se muestran los tubos donde se almacenan los 8 gramos de asfalto necesarios para el ensayo de viscosidad.



Fotografía 10. Viscosímetro rotacional

Para garantizar la manipulación y bombeo del cemento asfáltico en planta, la especificación Superpave recomienda que el ligante tenga una viscosidad máxima de 3000 cP a una temperatura de 135 °C (IPC, 1996).

Las temperaturas de mezclado y de compactación de las mezclas asfálticas dependen de la relación viscosidad–temperatura del ligante. En 1962, el Instituto

del Asfalto recomendó determinar las temperaturas de mezclado y compactación para intervalos de viscosidad de 170 ± 20 centistokes y 280 ± 30 centistokes (Saybolt Furol), respectivamente (Asphalt Institute, 1962). Las especificaciones Superpave conservaron estos valores para el diseño de mezclas asfálticas, determinando la viscosidad por medio del viscosímetro rotacional RTV. En el Sistema Internacional, la viscosidad para mezclado es de $0.17 \pm 0.02 Pa \cdot s$, y $0.28 \pm 0.03 Pa \cdot s$ para compactación (TRB, 2010).

Para este ensayo se determinó la curva reológica con cuatro puntos para cada una de las muestras, y se determinó la temperatura de mezclado y compactación para los intervalos de viscosidad que se requieren para los mismos. En la Tabla 10 se presentan las temperaturas de mezclado y compactación determinadas por medio de la viscosidad para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. Estos resultados se analizan en el aparte 3.3.

Tabla 10. Temperaturas de Compactación y Mezclado en °C

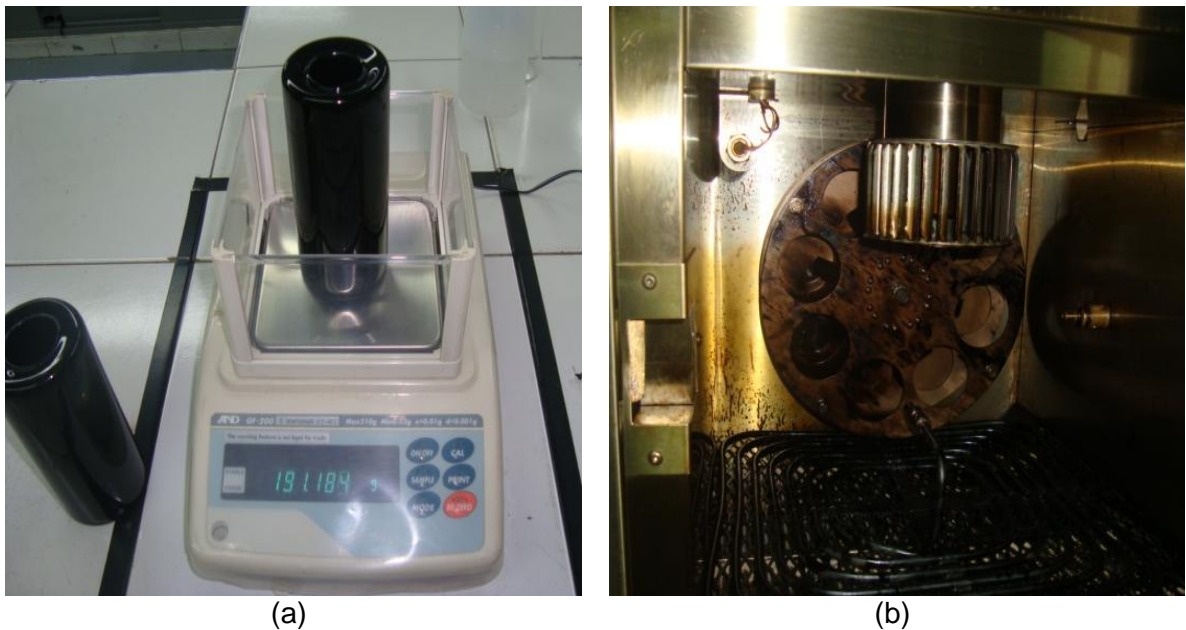
% LDPE	Temperatura de Compactación			Temperatura de Mezclado		
	30 min	60 min	90 min	30 min	60 min	90 min
0		137			147	
1	136	138	158	156	159	175
2	139	140	159	166	169	176
3	148	152	162	172	174	179
4	157	157	167	176	177	180
5	162	164	170	179	181	183
6	165	168	172	183	182	184
7	169	170	170	184	185	185

2.4.6 Envejecimiento del ligante en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento

El ensayo de envejecimiento de asfaltos en el horno rotatorio de lámina delgada (RTFOT por sus siglas en inglés Rolling Thin Film Oven Test), es un ensayo que tiene dos finalidades, una primera es producir un ligante oxidado para emplearse en ensayos adicionales (DSR y material base para PAV), y como segunda determinar la cantidad de volátiles perdidos, como indicador del envejecimiento, que puede ocurrir durante el proceso de mezclado en planta y colocación en obra de la mezcla asfáltica. El RTFOT es usado por su repetibilidad y porque expone continuamente el ligante a calor y flujo de aire; su rotación continua mantiene, en algunos casos, los modificadores (polímeros) dispersos en el asfalto.

Durante el ensayo, 35 ± 0.5 g de asfalto son colocados dentro de una botella de vidrio, la cual es montada junto con otras siete botellas sobre un carrusel que gira verticalmente dentro del horno. La muestra es sometida a 163°C por un periodo de 85 minutos bajo un caudal constante de aire de 4000 ml/min. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-720-07 (Invías, 2007b).

En la Fotografía 11a se presenta el pesaje del conjunto botella-muestra, medida que se utiliza para determinar la pérdida de masa que presenta el ligante después del proceso de envejecimiento en el horno rotatorio de película delgada.



Fotografía 11. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT), (a) botellas con muestra (b) Equipo RTFOT

La pérdida de masa se determinó solamente para el diseño óptimo (ver diseño óptimo en el aparte 3.2), y su valor fue de 0.34%, cuyo valor es inferior al 1%, valor especificado por el Invías para cementos asfálticos modificados con polímeros (Tabla 1). Este parámetro sirve para garantizar que durante el proceso de mezclado y de construcción, el asfalto no tenga un comportamiento volátil por las altas temperaturas.

2.4.7 Envejecimiento del ligante en la Cámara de Envejecimiento a Presión

El envejecimiento del ligante en la Cámara de Envejecimiento a Presión PAV (por sus siglas en inglés Pressure Aging Vessel) se realiza para simular el envejecimiento del asfalto durante la puesta en servicio del mismo. El ensayo se

realiza con ligante previamente acondicionado mediante el procedimiento de ensayo RTFOT, del cual se extrae la muestra y se coloca en las bandejas del PAV. El ensayo consiste en someter el asfalto a una presión de 2.1 MPa y una temperatura de 100°C durante 20 horas; seguido a esto se despresuriza la cámara lentamente durante 8 a 15 minutos hasta llegar a presión atmosférica, y someterla durante 30 minutos a una presión de vacío de 15 kPa para retirar el aire atrapado en la muestra. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-751-07 (Invías, 2007d).

En la Fotografía 12 se presenta la muestra del diseño óptimo que fue envejecida en la cámara.



Fotografía 12. Acondicionamiento de cemento asfáltico en Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV), (a) bandejas con muestra, (b) Equipo PAV

2.4.8 Caracterización del comportamiento visco-elástico por medio del reómetro de corte dinámico DSR

El ligante asfáltico es un sistema coloidal conformado por micelas de asfaltenos (conglomerado de moléculas que constituye una fase coloidal) de un alto peso molecular, dispersas en un medio aceitoso de bajo peso molecular conocido como maltenos (anillos aromáticos, nafténicos y con muy pocas cadenas parafínicas). Es esta estructura coloidal la que define las propiedades reológicas del ligante moviéndose de un estado sólido (comportamiento newtoniano dominante) a un estado gel (comportamiento no newtoniano dominante) (YUSOFF N.I.M. *et al.*, 2010). El comportamiento visco-elástico de un cemento asfáltico puede ser estimado por medio del módulo de corte complejo G^* y el ángulo de fase δ , los cuales son medidos por medio del reómetro de corte dinámico (DSR por las siglas en inglés de Dynamic Shear Rheometer).

Durante el ensayo se simulan las temperaturas de servicio de una mezcla asfáltica, y de esta manera conocer qué parte de la deformación es elástica (recuperable) y qué parte es viscosa (no recuperable) bajo ciertas condiciones de carga. Entre mayor sea el ángulo de fase δ de un ligante, menos elástico será, lo que implica que las deformaciones permanentes o no recuperables serán mayores que en un asfalto que presente un ángulo de fase menor.

El equipo utilizado fue un reómetro AR200EX. El ensayo consiste en colocar entre dos placas, una fija y una oscilante, separadas a cierta distancia graduada la cual depende de la temperatura a la que se lleve el ensayo, una cantidad necesaria de asfalto que será sometida a esfuerzo o deformación constante por la placa oscilatoria. El módulo complejo es entonces la relación entre el esfuerzo cortante máximo y la deformación por corte máxima (Ecuación 2), y el ángulo de fase es el

tiempo de desfase que existe entre el esfuerzo aplicado y la deformación que produce este esfuerzo. La norma que se siguió para el procedimiento fue la INV E-750-07 (Invías, 2007c).

$$G^* = \frac{\tau_{\max}}{\epsilon_{\max}}$$

Ecuación 2

En la Fotografía 13a se presentan las muestras provenientes del RTFOT y del diseño optimo sin envejecer. Los resultados de este ensayo se analizan en el aparte 3.4.



(a)



(b)

Fotografía 13. Ensayo de caracterización del comportamiento visco-elástico con DSR, (a) muestras, (b) Equipo DSR

3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Escogencia de las condiciones óptimas de modificación

Los ensayos de penetración, punto de ablandamiento y recuperación elástica por torsión se realizaron a cada una de las muestras para determinar las condiciones óptimas del ligante modificado con polietileno de baja densidad. Los resultados de cada uno de los ensayos se analizaron por medio de gráficos comparativos donde se cotejaron con los valores especificados por el Instituto Nacional de Vías para este tipo de ligante (Tabla 400.4 del Artículo 400–07 del Invías). De esta manera fue posible determinar los diseños que cumplían con estos requerimientos.

3.1.1 Verificación por Penetración

En la Figura 5 se presentan los resultados del ensayo de Penetración para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. De acuerdo con el Invías, para un asfalto modificado con polímeros Tipo I (Tabla 1), se requiere que tenga una Penetración entre 55 dmm y 70 dmm.

De acuerdo con éste análisis, se puede determinar que los diseños que cumplen con la especificación son los siguientes:

- Para un tiempo de reacción de 30 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% y 6%.
- Para un tiempo de reacción de 60 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 1%, 2% y 3%.
- Para un tiempo de reacción de 90 minutos el porcentaje de adición de LDPE de 1%.

Se concluye entonces que los ligantes con porcentajes de LDPE por encima de 6% no cumplen con lo especificado para la Penetración.

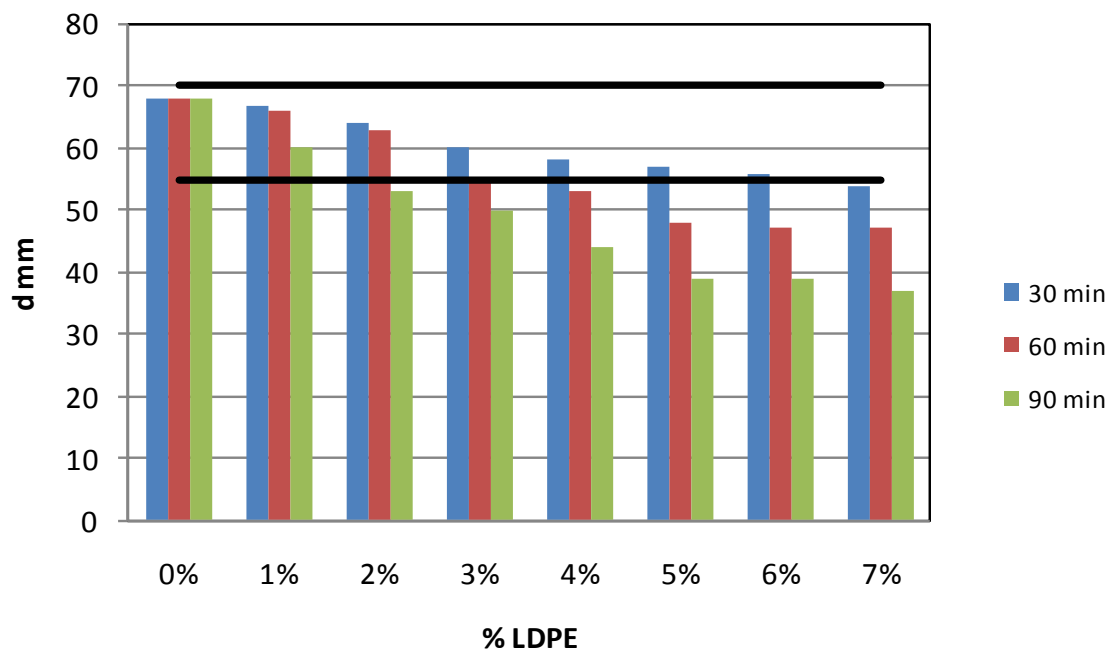


Figura 5. Resultados ensayo de Penetración

En la Figura 5 se observa que la consistencia de los ligantes se incrementa con el porcentaje de LDPE adicionado para su modificación; de la misma forma, esta propiedad se incrementa al incrementarse los tiempos de modificación.

3.1.2 Verificación por Punto de Ablandamiento

En la Figura 6 se presentan los resultados del ensayo de Punto de ablandamiento para el ligante sin modificar (0% de LDPE) y los ligantes modificados. De acuerdo con el Invías, para un asfalto modificado con polímeros Tipo I (Tabla 1), se requiere que tenga un Punto de ablandamiento mínimo de 58°C.

De acuerdo con éste análisis, se puede determinar que los diseños que cumplen con la especificación son los siguientes:

- Para un tiempo de reacción de 30 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 3%, 4%, 5%, 6% y 7%.
- Para un tiempo de reacción de 60 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 2%, 3%, 4%, 5%, 6% y 7%.
- Para un tiempo de reacción de 90 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% y 7%.

Se concluye entonces que los únicos diseños que no cumplen con lo especificado para Punto de ablandamiento son los que contienen 1% de adición de LDPE con tiempos de mezclado de 30 y 60 minutos y 2 % de adición de LDPE con tiempo de mezcla de 30 minutos.

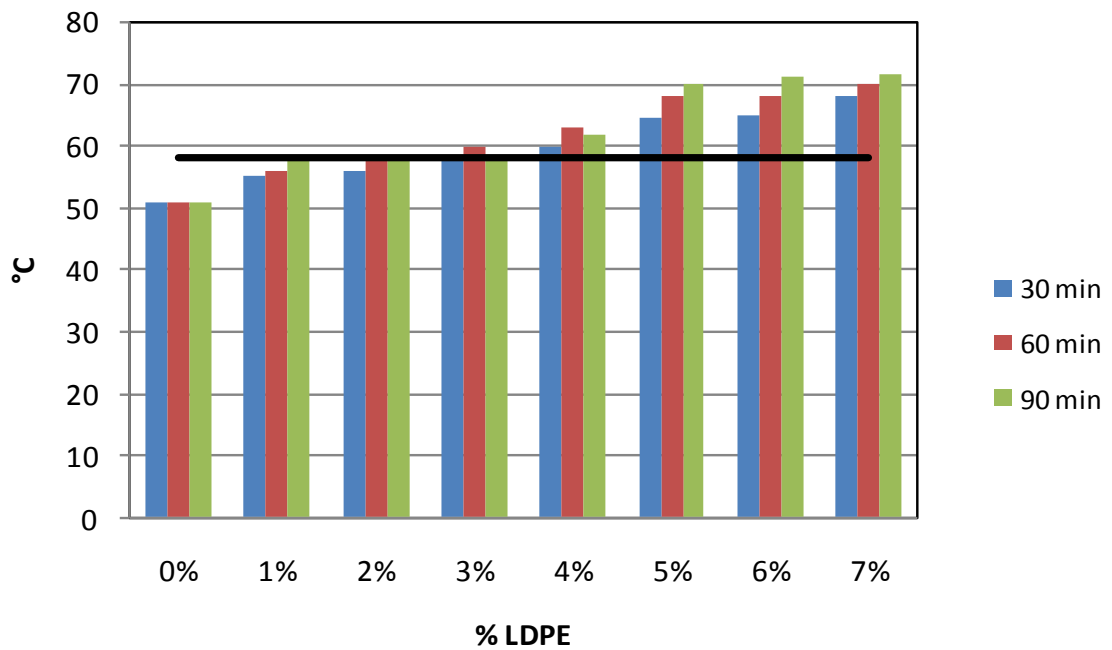


Figura 6. Resultados ensayo de Punto de ablandamiento

En la Figura 6 se observa que la temperatura en la que el ligante asfáltico tiende a fluir se incrementa con el porcentaje de LDPE adicionado para su modificación; de la misma forma, esta propiedad se incrementa al incrementarse los tiempos de modificación.

3.1.3 Verificación por Recuperación Elástica

En la Figura 7 se presentan los resultados del ensayo de Recuperación elástica por torsión para los ligantes modificados. De acuerdo con el Invías, para un asfalto modificado con polímeros Tipo I (Tabla 1), se requiere que tenga una Recuperación elástica por torsión mínimo del 15%.

De acuerdo con éste análisis, se puede determinar que los diseños que cumplen con la especificación son los siguientes:

- Para un tiempo de reacción de 30 minutos los porcentajes de adición de LDPE de 6% y 7%.
- Para un tiempo de reacción de 60 minutos el porcentaje de adición de LDPE de 7%.
- Para un tiempo de reacción de 90 minutos el porcentaje de adición de LDPE de 7%.

Se concluye entonces que el parámetro de Recuperación elástica por torsión fue el más determinante dentro de la escogencia del diseño optimo, ya que más del 80% de los diseños no cumplen con las especificaciones para este requisito.

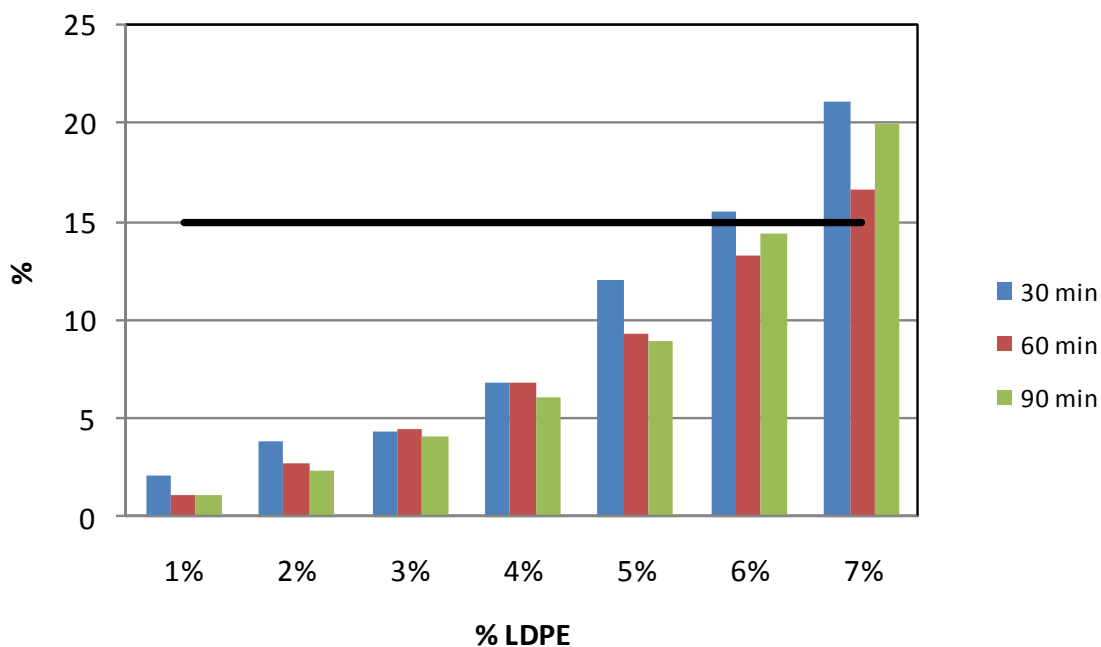


Figura 7. Resultados ensayo de Recuperación elástica por torsión

En la Figura 7 se observa que capacidad que tienen los diseños para recuperarse después de ser sometidos a una deformación se incrementa con el porcentaje de LDPE adicionado para su modificación; mientras que esta propiedad disminuye al incrementarse los tiempos de modificación.

3.2 Diseño óptimo

De acuerdo con el análisis a los resultados de los ensayos de selección (penetración, punto de ablandamiento y recuperación elástica) presentados en el aparte 3.1, el único diseño que cumple con los requisitos para las tres propiedades fue el diseño al cual se le adicionó un seis por ciento (6 %) de polietileno de baja densidad durante un tiempo de reacción de 30 minutos.

3.3 Ensayos complementarios

De acuerdo con lo especificado por el Instituto Nacional de Vías para un asfalto modificado con polímeros Tipo I (Tabla 1), los valores de Ductilidad y Viscosidad cinemática no son decisivos para calificar estos ligantes. Estos dos ensayos se realizaron dentro de esta investigación con el objeto de determinar cómo se afectan estas propiedades con los procesos de modificación planteados en este trabajo, y porque son indicadores del comportamiento del material.

3.3.1 Análisis por Ductilidad

En la Figura 8 se presentan los resultados del ensayo de Ductilidad para el ligante sin modificar y los ligantes modificados. Para esta propiedad, la Tabla 400.4 del Artículo 400–07 del Invías para un asfalto Tipo I, no especifica ningún valor.

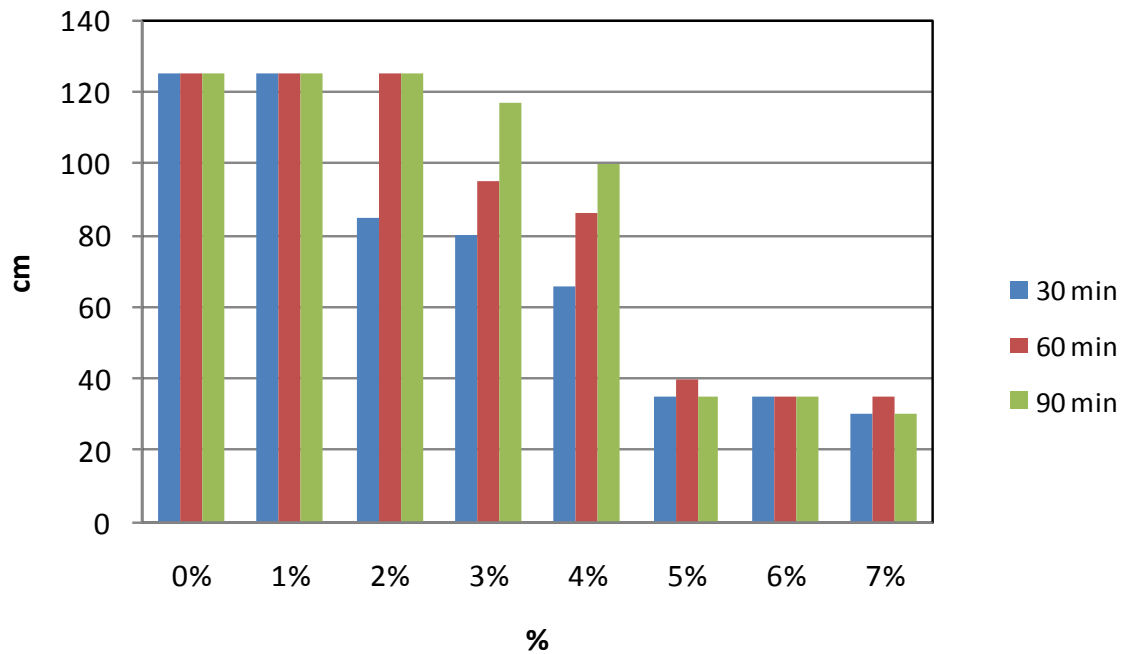


Figura 8. Resultados ensayo de Ductilidad

Se observa que la capacidad de elongarse de los diseños antes de sufrir una ruptura disminuye a medida que se le adiciona cierto porcentaje de LDPE en el proceso de modificación; sin embargo, esta propiedad se incrementa al

incrementarse los tiempos de modificación. Los comportamientos de los diseños antes mencionados se efectúan solo a partir de una adición de LDPE de 2%.

3.3.2 Análisis por Viscosidad Cinemática

En la Figura 9 a la Figura 11 se presentan los resultados del ensayo de viscosidad cinemática para el ligante convencional (sin modificar) y los ligantes modificados. Para esta propiedad, la Tabla 400.4 del Artículo 400-07 del Invías para un asfalto Tipo I, no especifica ningún valor.

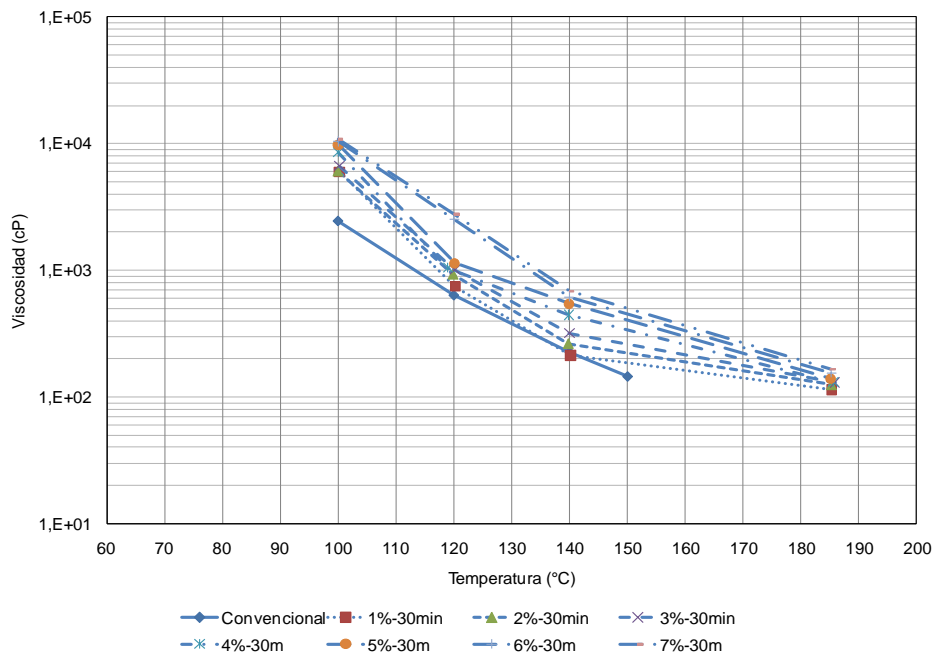


Figura 9. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 30 minutos

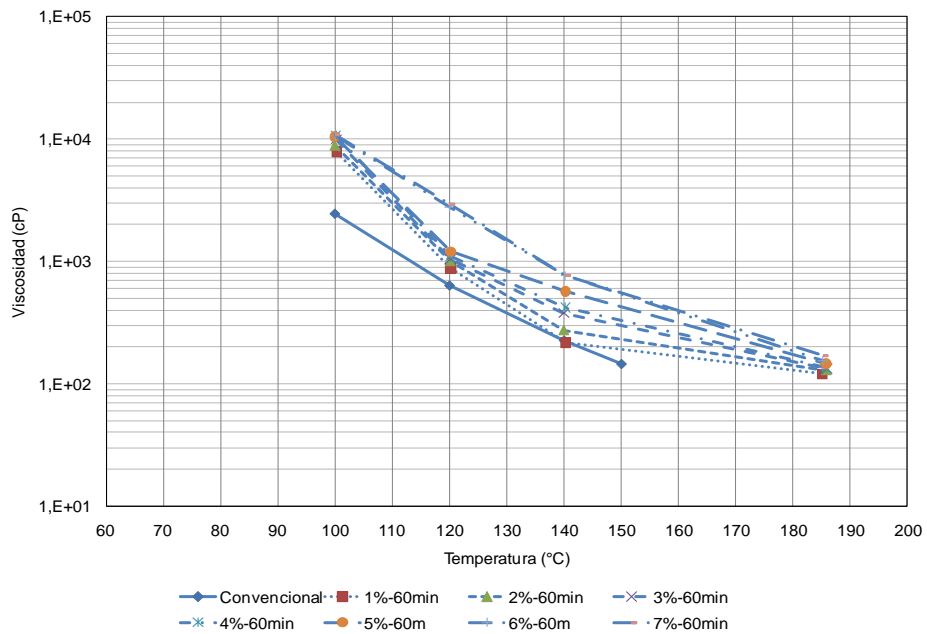


Figura 10. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 60 minutos

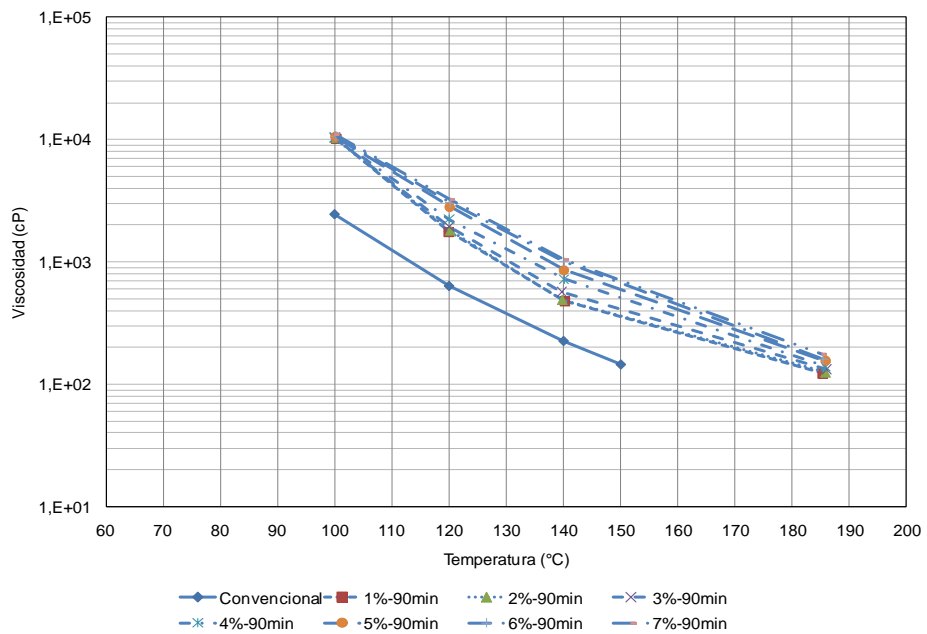


Figura 11. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con tiempo de reacción de 90 minutos

En las tres figuras anteriores se observa que la viscosidad aumenta a medida que se adiciona una mayor cantidad de LDPE. Lo anterior está relacionado con el incremento en la consistencia del ligante (aparte 2.4.1). Por lo tanto, la viscosidad de un ligante modificado con LDPE es proporcional a la cantidad de modificante. Respecto a los resultados obtenidos para la Ductilidad (aparte 2.4.4), se observa que el incremento de la viscosidad es inversamente proporcional a la ductilidad, esto debido probablemente a que durante la modificación del ligante, éste sufre un proceso de rigidización, el cual también se ve afectado por el aumento del tiempo de reacción con el polímero. Por último, respecto a la recuperación elástica torsional (aparte 2.4.3), se evidencia que éste parámetro es directamente proporcional a la viscosidad.

En la Figura 12 a la Figura 18 se presenta la variación de la viscosidad para cada ligante modificado y para el ligante sin modificar, respecto al tiempo de reacción.

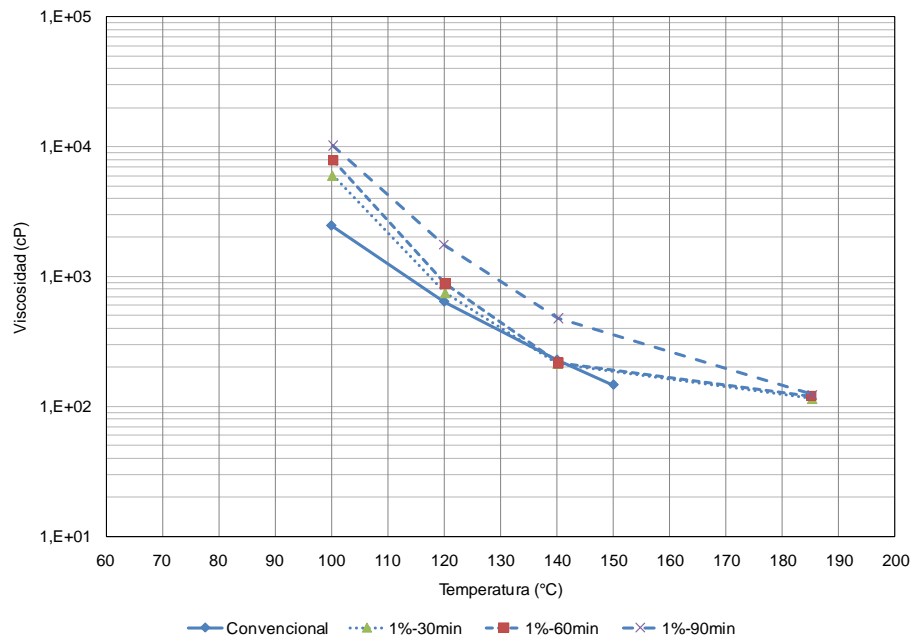


Figura 12. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 1%

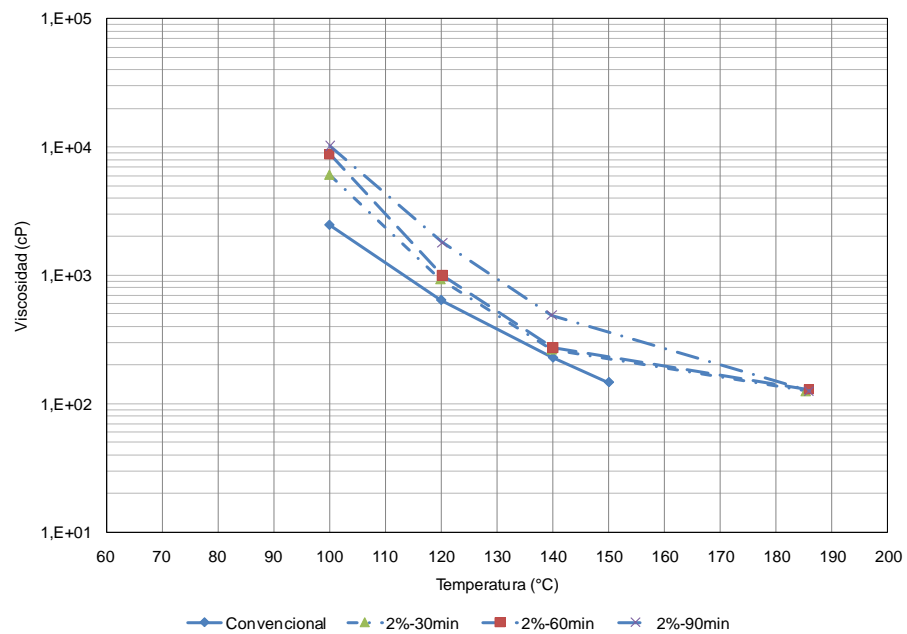


Figura 13. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 2%

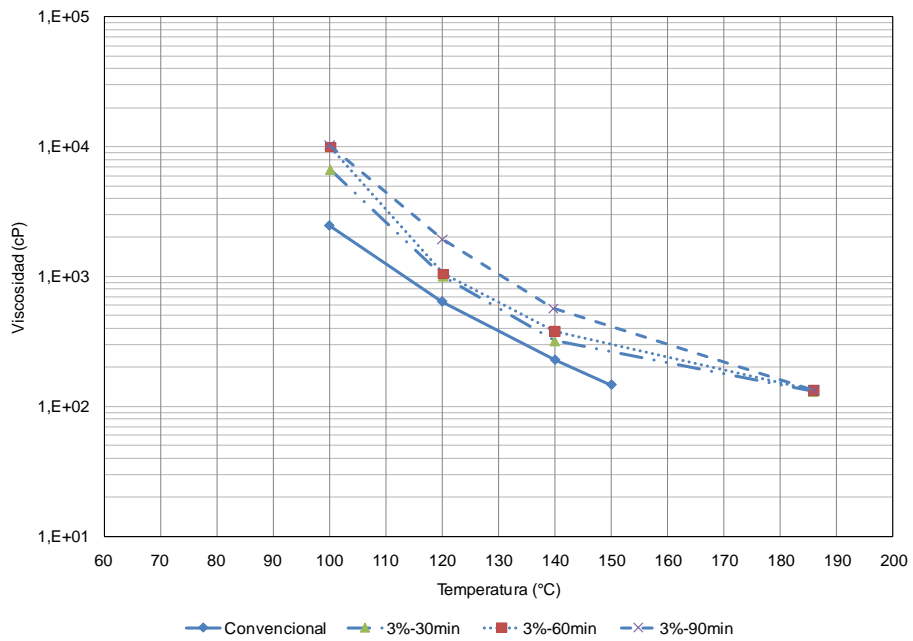


Figura 14. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 3%

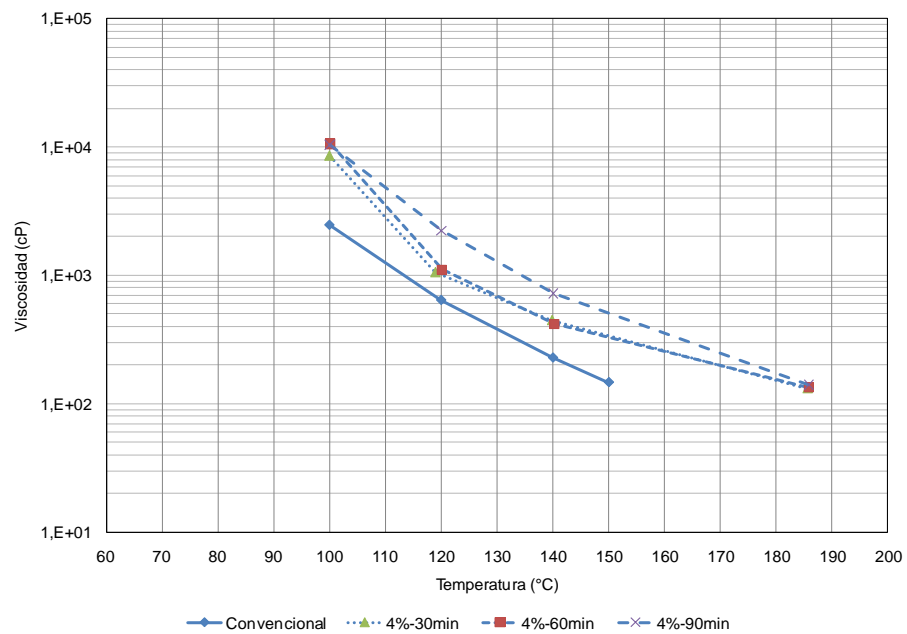


Figura 15. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 4%

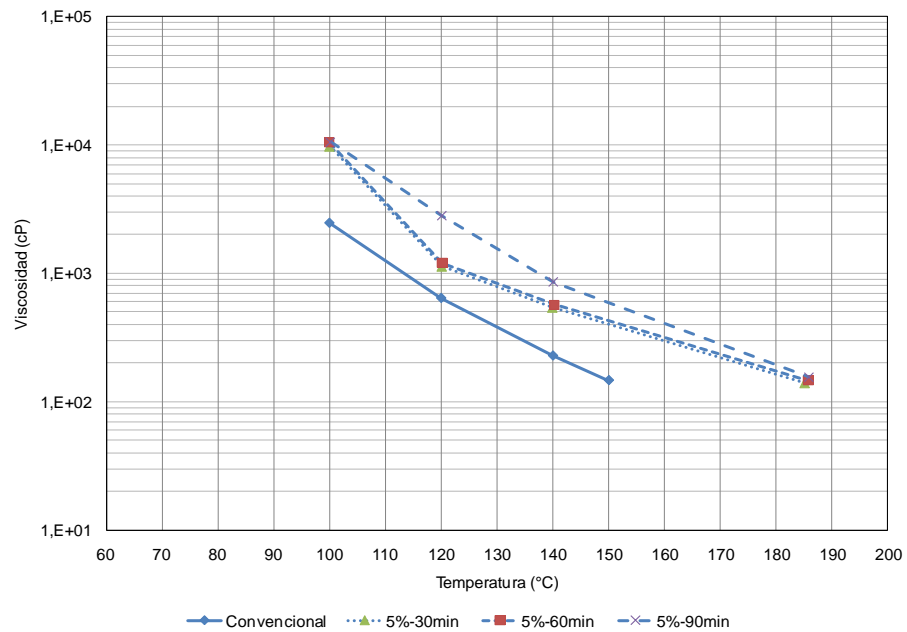


Figura 16. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 5%

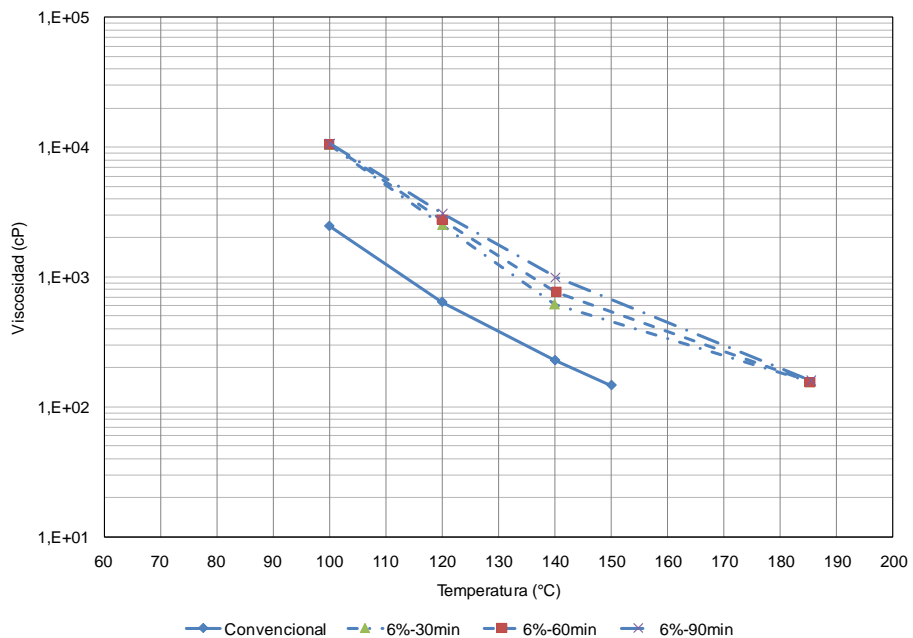


Figura 17. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 6%

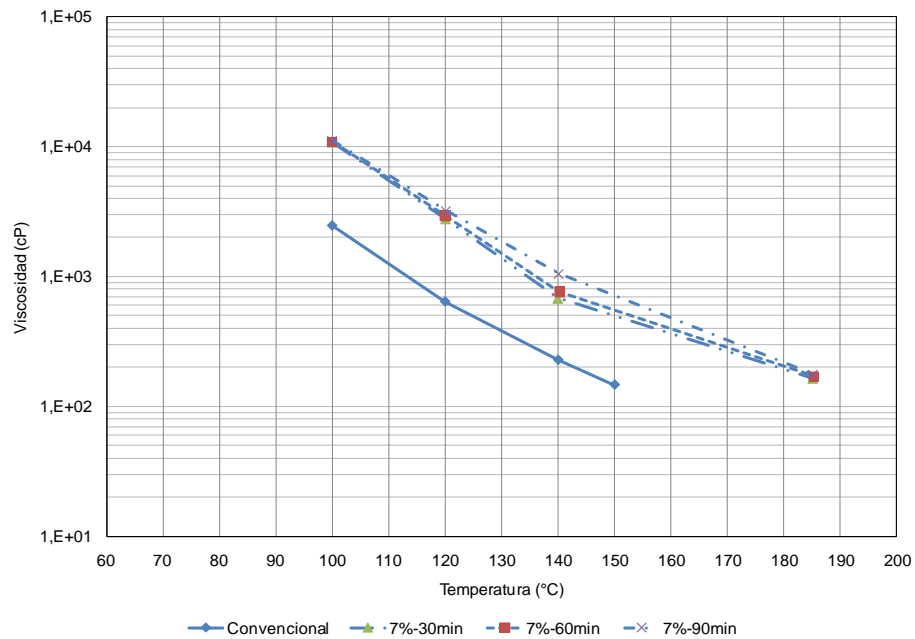


Figura 18. Curvas reológicas para todas las muestras de asfalto modificado con LDPE, con porcentaje de adición de LDPE de 7%

De la Figura 12 a la Figura 18 se observa que el cemento asfáltico modificado se vuelve más viscoso entre más tiempo haya durado su modificación; lo anterior se debe posiblemente a que al aumentar el tiempo de reacción las partículas de LDPE se fusionan de una mejor manera con el asfalto, generando así una mezcla mucho más homogénea.

En la Figura 19 se presentan las temperaturas de mezclado del ligante sin modificar y los ligantes modificados. Éstas temperaturas se obtuvieron con base en las curvas reológicas para cada uno de los diseños, y es la correspondiente al valor medio del intervalo de viscosidad ($0.17 \pm 0.02 Pa \cdot s$) que definió para mezclado Superpave mencionado en el aparte 2.4.5.

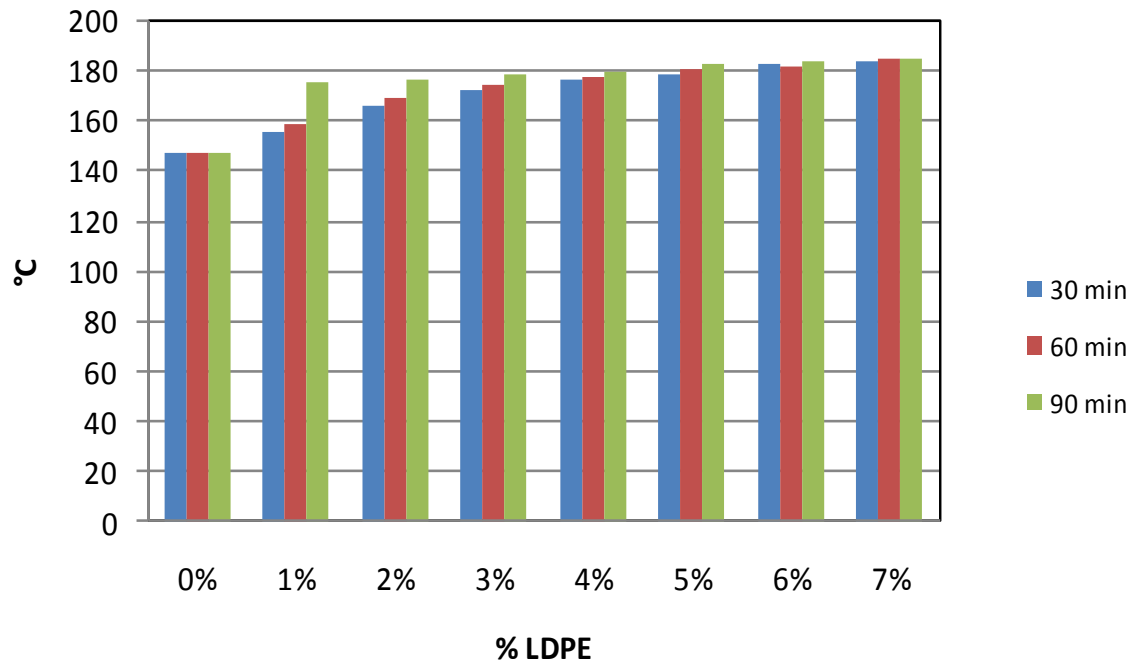


Figura 19. Temperaturas de Mezclado

Se puede observar que en la Figura 19 que la temperatura de mezclado de mezclas asfálticas con ligantes modificados con LDPE se incrementa con el porcentaje de LDPE adicionado y con los tiempos de modificación.

En la Figura 20 se presentan las temperaturas de compactación del ligante sin modificar y los ligantes modificados. Éstas temperaturas se obtuvieron con base en las curvas reológicas para cada uno de los diseños, y es la correspondiente al valor medio del intervalo de viscosidad ($0.28 \pm 0.03 Pa \cdot s$) que definió para compactación Superpave mencionado en el aparte 2.4.5.

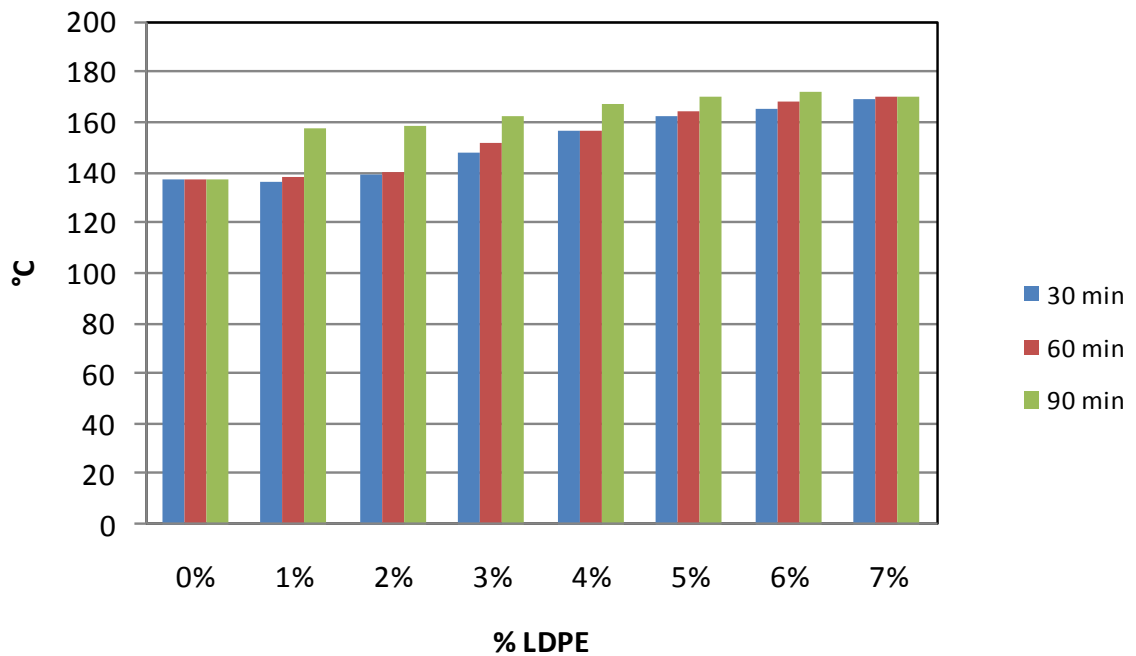


Figura 20. Temperaturas de Compactación

De la misma forma que para mezclado, se observa en la Figura 20 que la temperatura de compactación de mezclas asfálticas con ligantes modificados con LDPE se incrementa con el porcentaje de LDPE adicionado y con los tiempos de modificación.

Las especificaciones Superpave exigen un valor de viscosidad, medida en el viscosímetro rotacional, para ligantes sin envejecer, máxima de 3000 cP a una temperatura de 135 °C, esto con el fin de garantizar que el asfalto pueda ser bombeado de una manera adecuada en planta. Para el diseño óptimo se encontró que este valor es de 860 cP, por lo que se concluye que el diseño óptimo presenta un comportamiento favorable.

3.4 Ensayos especiales realizados sobre el diseño óptimo

En este aparte se realizó el análisis del comportamiento reológico del ligante modificado con las condiciones óptimas y del ligante convencional 60/70 de Barrancabermeja, según las especificaciones Superpave, teniendo como base los resultados del módulo de corte complejo G^* y el ángulo de fase δ para cada una de las muestras sin envejecer y envejecidas.

3.4.1 Análisis por deformación permanente

En la Figura 21 se comparan los factores de ahuellamiento ($G^*/\sin \delta$) para un asfalto convencional 60/70 sin envejecer y el diseño óptimo (6% y 30 minutos) sin envejecer. En esta figura se observa que para todas las temperaturas en las que se determinó el factor de ahuellamiento, éste es mayor para el ligante modificado con polietileno de baja densidad (diseño óptimo) que para el ligante convencional; es decir, en todos los casos, el ligante modificado óptimo presenta una mayor resistencia a la deformación por ahuellamiento que un asfalto convencional. Se observa también que ambos ligantes cumplen con el requisito de Superpave, el cual especifica que éste parámetro debe ser superior a 1 kPa. Otro fenómeno que se evidencia es que a medida que aumenta la temperatura, el asfalto pierde resistencia al ahuellamiento, esto ocurre tanto para el diseño óptimo como para el convencional.

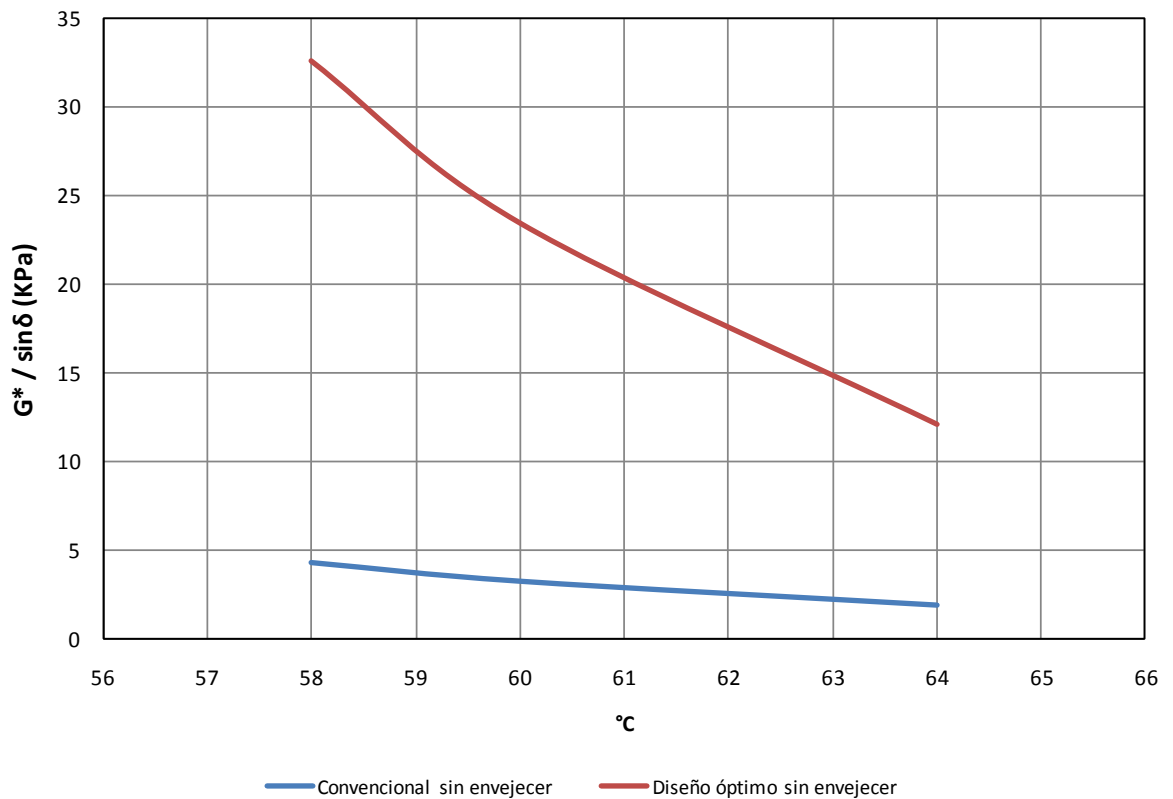


Figura 21. Factor de ahuellamiento para diseño óptimo sin envejecer y para asfalto convencional 60/70 sin envejecer

3.4.2 Análisis por Fisura a la fatiga

En la Figura 22 se comparan los factores de agrietamiento por fatiga ($G^* \cdot \sin \delta$) para los ligantes envejecidos en PAV para el asfalto convencional 60/70 y el diseño óptimo (6% y 30 minutos). Se observan dos comportamientos diferentes para estos ligantes, ya que a una menor temperatura el ligante convencional tiene un mayor factor de agrietamiento, mientras que el diseño óptimo muestra su menor valor de factor de agrietamiento a la menor temperatura a la que se ensayó para que cumpliera con la especificación Superpave, ésta propone un valor

máximo para el producto de (G^*) por ($\sin \delta$) de 5000 kPa para asfaltos envejecidos en cámara de envejecimiento (PAV), de lo que se puede deducir que el ligante modificado funciona y cumple con las especificaciones a menores temperaturas que el ligante convencional y este es el comportamiento deseado, ya que entre menor sea el factor de fatiga mayor resulta la resistencia a la fisuración por fatiga.

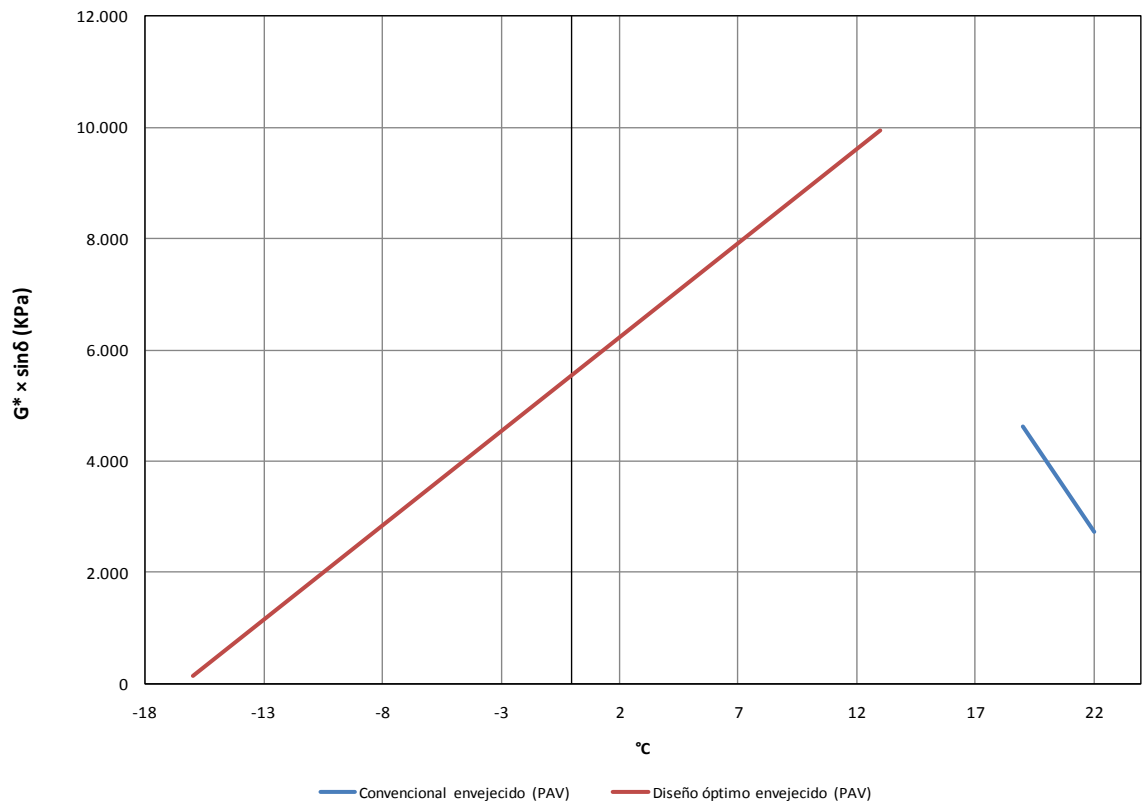


Figura 22. Factor de agrietamiento por fatiga para el diseño óptimo envejecido (PAV) y para un asfalto convencional 60/70 envejecido (PAV)

3.4.3 Determinación del Grado de Desempeño

Tal cual se mencionó en el aparte 1.4.3, el grado de desempeño muestra las temperaturas máxima y mínima a las que se asegura que el ligante cumplirá con las especificaciones expresadas por Superpave. Se encontró que para el ligante convencional 60/70 normalizado de Barrancabermeja, la temperatura máxima de desempeño es de 64 °C y la mínima temperatura a la que cumple con la especificación por factor de agrietamiento es de 19 °C, por lo que se puede decir que el ligante original sin modificar posiblemente tendría un grado de desempeño PG 64-34; sin embargo, esto no es posible afirmarlo ya que no se realizó el ensayo de viga a flexión, el cual se utiliza como complemento para escoger esta temperatura, la cual debe ser la mayor entre los dos resultados.

Luego de la modificación con el diseño óptimo (6% de LDPE durante 30 min) se encontró que éste mismo asfalto cambia su temperatura máxima de desempeño de 64 °C a 82 °C, y posiblemente a una temperatura mínima de desempeño de -118 °C, ya que a la temperatura que cumple el requisito de factor de agrietamiento es de -16 °C.

Tabla 11. Grado de desempeño

Cemento Asfáltico	Convencional	Diseño óptimo
Grado de desempeño	PG 64 - # ¹	PG 82 - # ²
Cemento asfáltico sin envejecer		
Viscosidad Brookfield	Máximo 3 Pa.s	
Viscosidad a 135 °C, Pa.s	0.28	0.86
Clasificación Superpave	Pasa	Pasa
DSR, 10 red/s	Mínimo 1 kPa	
$(G^* / \sin \delta)$, temperatura °C	64	82
Residuo de RTFOT		
DSR, 10 red/s	Mínimo 2.20 kPa	
$(G^* / \sin \delta)$, temperatura °C	64	82
Residuo de PAV		
DSR, 10 red/s	Máximo 5000 kPa	
$(G^* \cdot \sin \delta)$, temperatura °C	19	-14
Clasificación Superpave	-34	-118

1 El valor de la mínima temperatura no se pudo determinar.

4 CONCLUSIONES

Se evidenció que a medida que se incrementa el contenido de polietileno de baja densidad (LDPE), se alteran las propiedades del ligante de la siguiente forma: se incrementa la consistencia, la temperatura de fluidez, la recuperación elástica torsional, y la viscosidad cinemática, y decrece la capacidad de elongación del material. Al evaluar estos parámetros con lo especificado por el Instituto Nacional de Vías para asfaltos modificados con polímeros, en el artículo Artículo 400–07, se determinó que para unas condiciones de mezclado de 6000 rpm y una temperatura de 150°C, el contenido óptimo de LDPE corresponde a un contenido de seis por ciento (6%) mezclado durante un tiempo de reacción de 30 minutos.

Según las especificaciones Superpave y los análisis que de éste se desprenden, se mostró cómo el ligante modificado con el diseño óptimo garantiza en planta un debido comportamiento durante los procesos de mezclado y construcción y también que no presentará problemas con el bombeo del ligante. Respecto a las propiedades que el asfalto presentará durante la puesta en servicio, se evidencia que el cemento asfáltico modificado experimenta mejoras, frente al convencional, a la resistencia ante fallas por ahuellamiento y por agrietamiento.

Se logró determinar el grado superior del grado de desempeño, tanto del asfalto convencional como del asfalto modificado con el diseño óptimo. No fue posible determinar la temperatura inferior del grado de desempeño de estos ligantes por disposición del equipo para adelantar el ensayo BBR (viga a flexión).

5 RECOMENDACIONES

Se recomienda, en el momento de realizar la modificación del ligante con un equipo homogeneizador de asfaltos, tener precaución con el procedimiento a realizar, ya que el equipo girar a altas revoluciones y puede presentar salpicaduras de ligante que se encuentra a altas temperaturas.

Por medio del ensayo en el reómetro de corte dinámico fue posible determinar la temperatura superior del grado de desempeño PG para el diseño óptimo y para el ligante convencional; sin embargo, y debido a la imposibilidad de adelantar el ensayo de viga a flexión (BBR), no fue posible determinar la temperatura inferior del PG. Por lo anterior, se recomienda para futuras investigaciones, adelantar este ensayo para determinar con certeza el intervalo de temperatura de desempeño de estos ligantes modificados con polietileno de baja densidad.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ARENAS, Hugo. Tecnología del cemento asfáltico. Cali: Universidad del Cauca, 2006. 253 p. ISBN 978-958-33-9988-6.
- Asphalt Institute. The Asphalt handbook. Lexington, Ky.: Asphalt Institute, 1962. 832 p. ISBN 9781934154274.
- CASEEY, Donnchadh, McNALLY, Ciaran, GIBNEY, Amanda, y GILCHRIST, Michael D. Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt. En: Resources, Conservation and Recycling. Junio, 2008. vol. 52, no. 10, p. 1167-1174.
- HäFELE, M., KIENLE, A., BOLL, M., y SCHMIDT, C. U. Modeling and analysis of a plant for the production of low density polyethylene. En: Computers & Chemical Engineering. 2006. vol. 31, no. 2, p. 51-65.
- HUANG, Yang H. Pavement analysis and design. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2004. p. ISBN 0131424734.
- HUANG, Yue, BIRD, Roger N., y HEIDRICH, Oliver. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. En: Resources, Conservation and Recycling. 2007. vol. 52, no. 1, p. 58-73.
- Instituto Nacional de Vías. Ductilidad de los materiales asfálticos, INV E-702. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007a. 5 p.
- Instituto Nacional de Vías. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, INV E-720. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007b. 8 p.
- Instituto Nacional de Vías. Medición de propiedades reológicas de los materiales asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico, INV E-750. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007c. 28 p.

- Instituto Nacional de Vías. Método de envejecimiento acelerado de ligantes asfálticos utilizando cámara de envejecimiento a presión (PAV), INV E-751. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007d. 9 p.
- Instituto Nacional de Vías. Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional, INV E-717. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007e. 5 p.
- Instituto Nacional de Vías. Penetración de los materiales asfálticos, INV E-706. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007f. 8 p.
- Instituto Nacional de Vías. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola), INV E-712. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007g. 7 p.
- Instituto Nacional de Vías. Recuperación elástica por torsión de asfaltos modificados, INV E-727. Bogotá D.C.: El Instituto, 2007h. 5 p.
- Instituto Panamericano de Carreteras. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE, FHWA-SA-95-003. Caracas, Venezuela: El Instituto, 1996. 89 p.
- REYES, Fredy, y FIGUEROA, Ana S. Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas. Síntesis de la investigación colombiana. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2008. 104 p. ISBN 978-958-716-136-6.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Mixing and Compaction Temperatures of Asphalt Binders in Hot-Mix Asphalt. Washington, D.C.: TRB, 2010.
- YUSOFF, Nur Izzi Md, SHAW, Montgomery T., y AIREY, Gordon D. Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders. En: Construction and Building Materials. 2010. vol. 25, no. 5, p. 2171-2189.

Evaluación de las propiedades físicas de un cemento asfáltico 60/70 modificado con residuos de la fabricación de productos con polietileno de baja densidad
