

CARACTERIZACION FÍSICA Y REOLÓGICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60-70 MODIFICADO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.

**MARIA FERNANDA APONTE CUITIVA
PAOLA ANDREA BELTRAN VASQUEZ**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2013**

CARACTERIZACION FÍSICA Y REOLÓGICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60-70 MODIFICADO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS.

**MARIA FERNANDA APONTE CUITIVA
PAOLA ANDREA BELTRAN VASQUEZ**

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

**MANUEL SANTIAGO OCAMPO TERREROS
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.**



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

2013

APROBACIÓN

El Trabajo de Grado titulado “CARACTERIZACION FÍSICA Y REOLÓGICA DE UN LIGANTE ASFÁLTICO 60-70 MODIFICADO PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS”, desarrollado por las estudiantes PAOLA ANDREA BELTRAN V. y MARIA FERNANDA APONTE C., en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontifica Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el título de Ingeniero Civil, fue aprobado por:

Director de Tesis

Manual Santiago Ocampo Terreros

Jurado

DEDICATORIA

A Dios por permitirme realizar este trabajo de grado, dándome fuerza para afrontar los obstáculos presentados a lo largo de este proceso.

A mis padres José Luis Aponte C. y Martha Patricia Cuitiva R., a mis hermanos Sebastián Aponte y José Luis Aponte por creer en mí, apoyándome, y ayudando a que mis sueños se hicieran realidad, y a mi novio Alex Orlando Rodríguez, por su amor paciencia, comprensión.

María Fernanda Aponte Cuitiva

Este trabajo de grado se lo dedico a mis padres María Stella Vásquez B. y Fabio Beltrán B., mis hermanos Diana Beltrán V. y Fabio Beltrán, quienes me han apoyado incondicionalmente para poder llegar a esta instancia de mis estudios ya que siempre han estado presentes en este proceso, A Dios por permitirme realizar todo lo que me propongo, dándome fuerza para afrontar los obstáculos presentados a lo largo de este proceso.

Paola Andrea Beltrán Vásquez

AGRADECIMIENTOS

Es de gran importancia reconocer la ayuda que de una u otra manera se recibió en el transcurso del desarrollo de este proyecto, es por esto que nos gustaría expresar y dar el reconocimiento merecido a todos aquellos que aportaron con su colaboración.

En primer lugar agradecemos a nuestras familias, las cuales nos brindaron su apoyo incondicional en cada etapa de nuestra formación como Ingenieras Civiles y en nuestra formación como personas, gracias a ellos podemos culminar con nuestros estudios de pregrado y este proyecto de grado, junto con el apoyo que nos brindó la Pontificia Universidad Javeriana y los catedráticos de esta universidad por quienes hemos llegado a obtener los conocimientos necesarios para poder desarrollar la tesis de manera especial

De la misma forma queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestro Director de tesis, el Ingeniero Manuel Ocampo, que gracias a su apoyo y seguimiento fue posible culminar con los objetivos de este proyecto.

Al Ingeniero Wilmar Fernández por su apoyo en nuestro proceso de investigación, poniendo a nuestra disposición todos sus conocimientos.

Al técnico Leonardo Romero al igual que todos los técnicos del laboratorio de la universidad quienes nos colaboraron con sus conocimientos en la realización de los ensayos de laboratorio, y quienes mostraron un carácter incondicional durante la ejecución del proyecto.

Para finalizar agradecemos a la Ingeniera Sandra Patricia Jarro, quien nos brindó su apoyo durante todo el proceso académico de pregrado, brindándonos comprensión, motivándonos día tras día a convertirnos en unas Ingenieras Integrales para servir a la comunidad.

RESUMEN

En la fabricación de mezclas asfálticas convencionales se ha generado un interés particular en el aspecto ambiental debido a la contaminación producida por los gases tóxicos que están contaminando el medio ambiente. Es por esto que se han venido implementando nuevas tecnologías para reducir satisfactoriamente las temperaturas de mezclado, puesta en obra y compactación de la mezcla asfáltica.

Siendo consecuentes con esta problemática, este trabajo de grado se enfocó en estudiar el comportamiento físico y reológico de un ligante asfáltico proveniente de Barrancabermeja con penetración 60-70 modificado con dos aditivos químicos, REDISET™ WMX y CECABASE RT®. Estos aditivos tienen como función reducir las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica, comparadas con las temperaturas comúnmente empleadas en una mezcla asfáltica convencional. Este tipo de mezclas asfálticas se conocen como mezclas asfálticas tibias (WMA por sus siglas en inglés de Warm Mix Asphalt).

El ligante fue modificado con cinco porcentajes diferentes de cada aditivo y a tres temperaturas diferentes. El porcentaje óptimo de aditivo se escogió haciendo uso de la metodología reológica desarrollada por Casola para identificar las temperaturas de mezclado y compactación. El principio de esta metodología se basa en el ángulo de fase del asfalto. Los resultados obtenidos en este trabajo indicaron que la metodología de Casola no es aplicable a los asfaltos colombianos, por lo que se debe realizar un estudio más detallado con el fin de calibrar los coeficientes del modelo, con el fin de obtener resultados que se ajusten a las temperaturas de mezclado y compactación esperadas para este tipo de ligantes. Sin embargo, y analizando los resultados obtenidos aplicando el modelo de Casola, se pudo inferir los contenidos óptimos de cada aditivo para la modificación del ligante Barrancabermeja 60-70.)

Palabras claves

Mezclas asfálticas tibias, CECABASE, REDISSET, caracterización del ligante, viscosidad rotacional, reducción emisiones de gases, Angulo de fase, Curvas maestra, temperatura de mezclado, temperatura de compactación.

ABSTRACT

The manufacturing process of conventional asphalt mixes has generated a particular interest due to the environmental contamination produced by the emanated toxical gases. New asphaltic mix technologies are being implemented in order to reduce its mixing, application and compactation temperatures.

This work is focused on the study of the physical and rheological behaviour of one particular asphaltic binder produced in Barrancabermeja; this binder has a 60–70 penetration and it has been modified with the following chemical additives: REDISET™WMXy CECABASE RT®. These additives have as primary objective, the reduction of the conventional mixing and compactation temperatures for the asphaltic mix. The final result is known by the name of Warm Mix Asphalt.

The binder was modified with five different percentages of each additive applied at three different temperatures. The optimal percentage was chosen using the Casola's rheological methodology, which identifies the mixing and compactation temperatures. this methodology is based on the asphalt's phase angle.

The results gathered from this study, indicate that the Casola's methodology is not applicable to the Colombian asphalts. A deeper study must be carried on in order to calibrate the model's coefficients, it will lead us to adjust and obtain the expected results for the binder's mixing and compactation temperatures. However, the assessment of the results obtained from the application of Casola's methodology, gave us the optimal percentages of each additive to be applied to the Barrancabermeja's 60–70 binder.

Key words

Warm mix asphalt, CECABASE RT[®], REDISSET[™] WMX, Binder Aging Characteristics, rotational viscosity, gas emissions reduction, phase angle, mastercurves, mixing temperature, compaction temperature.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1 OBJETIVOS	5
1.1 Objetivo General	5
1.2 Objetivos Específicos	5
2 MARCO CONCEPTUAL	7
2.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO	7
2.2 TECNOLOGIAS DE ADITIVOS PARA MEZCLAS TIBIAS DE ASFALTO	12
2.3 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS MATERIALES	15
2.3.1 Ligante Asfáltico	15
2.3.2 CECABASE RT [®]	16
2.3.3 REDISSET [™] WMX	19
2.4 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	22
2.4.1 Penetración de los Materiales Asfálticos	23
2.4.2 Gravedad Específica	24
2.4.3 Punto de Ablandamiento	25
2.4.4 Viscosidad Rotacional	26
2.4.5 DSR	28

3	MATERIALES Y METODOS	31
3.1	Materiales	31
3.1.1	Ligante Asfáltico	31
3.1.2	Aditivos para mezclas tibias	32
3.2	Métodos	33
3.2.1	Modificaciónde Asfalto	33
3.2.2	DSR (Reómetro de Corte Dinámico)	36
3.2.3	Curva Maestra	37
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	43
4.1	MODIFICACION DE ASFALTO BARRANCABERMEJA 60-70 CON ADITIVO CECABASE RT[®] Y ADITIVO REDISSET[™]WMX	43
4.1.1	MODIFICACIÓN REDISSET [™] WMX	43
4.1.2	Modificación CECABASE RT [®]	45
4.2	CURVAS ORIGINALES DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO REDISSET[™]WMX	46
4.3	CURVAS ORIGINALES DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO CECABASE RT[®]	47
4.4	CURVA MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA EL ASFALTO ORIGINAL	49
4.5	CURVAS MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICION) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO CECABASE RT[®]	50
4.6	CURVAS MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO REDISSET[™] WMX	52

4.7 CONTENIDO ÓPTIMO DE ADITIVO EN EL ASFALTO	54
4.7.1 Modelo de ángulo de fase de Casola	54
4.7.2 Contenido óptimo de CECABASE RT [®]	56
4.7.3 Contenido óptimo de REDISET [™] WMX	57
4.8 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN ASFALTO BARRANCABERMEJA PENETRACIÓN 60-70 SIN MODIFICAR; ASFALTO MODIFICADO CON CECABASE RT[®] Y CON REDISET[™] WXM.	59
4.8.1 Ensayo de penetración	60
4.8.2 Gravedad específica	61
4.8.3 Punto de ablandamiento.	62
4.8.4 Índice de penetración (IP).	63
4.8.5 Viscosidad rotacional.	64
5 DISCUSION	67
6 CONCLUSIONES	69
7 RECOMENDACIONES	71
8 BIBLIOGRAFÍA	73



LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A–CURVAS ORIGINALES DEL ÁNGULO DE FASE CONTRA LA FRECUENCIA ANGULAR.....	77
ANEXO B –CURVAS ORIGINALES DEL MÓDULO COMPLEJO DE CORTE CONTRA LA FRECUENCIA ANGULAR	78
ANEXO C–CURVAS MAESTRAS DE ANGULO DE FASE CONTRAFRECUENCIA ANGULAR PARA EL LIGANTE ORIGINAL Y PARA LOS LIGANTES MODIFICADOS CON REDISET™ WMX Y CECABASE RT®	79
ANEXO D–CURVAS MAESTRAS DE MODULO COMPLEJO CONTRA FRECUENCIA ANGULAR PARAEL LIGANTE ORIGINAL Y PARA LOS LIGANTES MODIFICADOS CON REDISET™ WMX Y CECABASE RT®	80
ANEXO E –ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS CON LOS CONTENIDOS ÓPTIMOS.	81



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Tecnologías y ventajas medio-ambientales para la producción de Mezclas, Fuente: Olard&Noan, 2007.....	10
Figura 2 Comportamiento del Cemento asfáltico, bajo características de Temperatura y Tiempo. Fuente: (Speier 1994).	16
Figura 3 Curvas antes de realizar superposición	39
Figura 4 Procedimiento después de realizar desplazamiento a una temperatura de desplazamiento para el desarrollo del TTS	39
Figura 5 Gráfica de curva maestra en el DSR SHIFT factor	39
Figura 6. Comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para la muestra RT-2%-145° C	46
Figura 7. Comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para la muestra RT-2%-145° C	47
Figura 8. Comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para la muestra CB-0.6%-165° C	48
Figura 9. Comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para la muestra CB-0.6%-165° C	48
Figura 10. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular asfalto original (Barrancabermeja con penetración 60-70)	49
Figura 11. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular para el asfalto modificado con CECABASE RT [®] (muestra CB-0.6%-165).....	50
Figura 12. Curva maestra de modulo complejo contra frecuencia angular para el asfalto modificado con CECABASE RT [®] (muestra CB-0.6%-165).....	51

Figura 13. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular para el asfalto modificado con REDISSET™ WMX (muestra RT-2%-145° C).....	52
Figura 14. Curva maestra de modulo complejo contra frecuencia angular para el asfalto modificado con REDISSET™ WMX (muestra RT-2%-145° C).....	53
Figura 15 Curvas para la determinación del contenido óptimo de CECABASE RT®.	57
Figura 16. Relación del porcentaje de aditivo Rediset™ WMX con respecto a la temperatura de mezcla.....	59
Figura 17 Comparación de ensayo de penetración.....	61
Figura 18 Comparación de Punto de ablandamiento contra tipo de ligante asfáltico	62
Figura 19 Comparación de índice de penetración contra tipo de ligante asfáltico.	64
Figura 20Viscosidad rotacional para ligante asfáltico original y modificados	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tecnologías para la producción de Mezclas Asfálticas Tibias.....	13
Tabla 2 Ensayos de caracterización de ligante asfáltico con penetración 60-70 Fuente. Normas INVIAS (INVIAS I.N.V., 2007).Fuente. Normas INVIAS (INVIAS I.N.V., 2007)	22
Tabla 3 Características del equipo K ultra- TURRAX T50 BASIC IKA-WERKE	34
Tabla 4 Datos de la modificación del ligante Asfáltico con el aditivo REDISET™ WMX.	44
Tabla 5 Datos de la modificación del ligante Asfáltico con el aditivo CECABASE RT®	45
Tabla 6. Resultados frecuencia angular (ω , en rad/s) para un ángulo de fase de 86°, en los ligantes modificados con CECABASE RT®	51
Tabla 7. Resultados frecuencia angular (ω , en rad/s) para un ángulo de fase de 86°, en los ligantes modificados con REDISET™ WMX.....	54
Tabla 8. Valores de los parámetros de calibración del modelo de Casola	55
Tabla 9. Temperatura de mezclado para cada porcentaje de aditivo CECABASE RT®	56
Tabla 10. Temperatura de compactación para cada porcentaje de aditivo CECABASE RT®	57
Tabla 11. Temperatura de mezclado para cada porcentaje de aditivo REDISET™ WMX.....	58
Tabla 12. Temperatura de compactación para cada porcentaje de aditivo REDISET™ WMX.....	58

Tabla 13 Especificaciones del cemento asfáltico según INVIAS Fuente:(INVIAS 2007).....	60
Tabla 14 Resultados ensayo penetración	60
Tabla 15 Datos de peso específico para ligante asfáltico 60-70 y para los contenidos óptimos	61
Tabla 16 Datos de punto de ablandamiento para ligante asfáltico 60-70 y para los contenidos óptimos	62
Tabla 17 Datos índice de Penetración (IP).....	63



LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1 Presentación producto CECABASE RT [®]	18
Fotografía 2 Preparación muestras para ensayo de penetración según normas INV E 706-07	23
Fotografía 3 Preparación muestras para ensayo de Gravedad Específica según norma INV E 707-07	24
Fotografía 4 Muestras para ensayo de punto de ablandamiento según norma INV E 712-07	26
Fotografía 5 Molde para ensayo de viscosidad Brookfield según norma INV E 717-07	27
Fotografía 6 Viscosímetro Rotacional según norma INV E 717-07	28
Fotografía 7 Reómetro dinámico de corte DSR de la Pontificia Universidad Javeriana	29
Fotografía 8 Muestras del DSR	30
Fotografía 9 Almacenamiento Muestras para el DSR	30
Fotografía 10 Almacenamiento ligante asfáltico Barrancabermeja 60-70	32
Fotografía 11 Presentación producto CECABASE RT [®]	32
Fotografía 12 Presentación producto Rediset [™] WMX	33
Fotografía 13 Equipo modificador- K ULTRA-TURRAX [®] T50 Basic IKA [®] - WERKE	34
Fotografía 14 Rodillo del equipo modificador	35
Fotografía 15 Procedimiento de mezclado con REDISSET [™] WMX	35
Fotografía 16 Equipo DSR	37



INTRODUCCIÓN

En la construcción de carreteras se implementó el uso de mezclas asfálticas en caliente a comienzos en el siglo XIX, donde en el año 1900 la firma PillotetEyquem elaboró la primera mezcla Asfáltica en caliente, la cual se ha venido utilizando con gran éxito hasta estos días (Cuberos 2006). Las mezclas que actualmente se implementan requieren de mayores temperaturas y ha venido generando efectos negativos al medio ambiente, lo que motivó a los investigadores a desarrollar mezclas asfálticas en frío. Las mezclas en frío ayudan satisfactoriamente a reducir los efectos negativos al ambiente, pero su uso se limita solamente a vías con bajos volúmenes de tránsito (Gobierno Nacional Republica de Panamá 2002). Es por esto que se han ido implementando productos que sean capaces de mejorar la elaboración de mezclas asfálticas con mejores propiedades reológicas, físicas y mecánicas, reduciendo el impacto al medio ambiente por emisión de gases contaminantes y el consumo elevado de combustible (Montejo 2006). Una de las tantas alternativas propuestas fueron presentadas por los ingenieros de vías, quienes desde aproximadamente diez años en Europa, y un poco más de cinco años en Estados Unidos, desarrollaron una mezcla asfáltica que puede ser mezclada y compactada a temperaturas más bajas que las requeridas por una mezcla asfáltica en caliente. A este tipo de mezclas se les ha denominado “mezclas asfálticas tibias” (WMA por sus siglas en inglés).

Las mezclas asfálticas tibias resultan ser una alternativa viable para reducir, inicialmente entre un 20% a un 35%, el consumo de combustibles requeridos en la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente, esperándose una reducción a largo plazo del 50% (Blades 2009); lo anterior permitirá generar un ahorro en el costo de combustible superior al 40%, en comparación con el consumo en la fabricación de una mezcla convencional (Estakhri, Rongji Cao et al. 2009). La utilización de estas tecnologías puede garantizar la elaboración y puesta en obra de mezclas asfálticas a temperaturas que por lo general están por debajo de los

100° C, utilizándose los mismos asfaltos y dosificaciones que para una mezcla asfáltica en caliente, empleándose las mismas plantas de mezclado existentes, y conservando la mayor parte de las propiedades mecánicas requeridas para una mezcla asfáltica convencional.

Para lograr resultados favorables, a la fecha se han desarrollado diversas tecnologías para modificar el ligante a utilizar en las mezclas asfálticas que se exigen hoy en día. Los modificadores más comunes se dividen en: aditivos a base agua, aditivos orgánicos, tecnologías de secuencia de bitúmenes duros y blandos (Gonzalez, Lingier et al. 2009; González-León, Caujolle et al. 2011), y tecnologías con aditivos químicos (Silva, Oliveira et al. 2010.).

Adicionalmente a lo anteriormente expuesto, la incorporación de estas tecnologías al medio colombiano potencializaría la vinculación al mercado de pavimentación de vías de una mezcla asfáltica que puede ser extendida y compactada en condiciones de bajas temperaturas, y en lugares donde se necesite el transporte de este tipo de material por largos periodos de tiempo (p.ej., Bogotá D.C.). En Colombia son muy pocos los estudios que se han desarrollado en mezclas asfálticas tibias modificadas con aditivos que generen una baja viscosidad y que se puedan utilizar para todo tipo de tráfico. Con base a esto se requieren generar investigaciones más detalladas en las cuales se estudien los diferentes comportamientos reológicos y mecánicos de este tipo de mezclas asfálticas, determinando también las reacciones que puedan generar un menor impacto ambiental al momento de implementar estas tecnologías. Para realizar estos estudios se debe tener en cuenta que los comportamientos de las mezclas tibias pueden variar de acuerdo al tipo de ligante y agregado.

En esta investigación se estudió un ligante asfáltico de penetración 60-70 modificado con dos aditivos químicos para mezclas asfálticas tibias, con el fin de determinar el contenido óptimo de cada aditivo en función de la mínima temperatura de mezclado. La conclusión de este trabajo, y los resultados

evidenciados en las mezclas del ligante modificado, estarán dirigidos al mejoramiento de los procesos de mezclado y compactación de mezclas asfálticas tibias, donde su futura implementación en Colombia será una alternativa que aportará a solucionar las problemáticas ambientales que se evidencian a nivel mundial. En Colombia, estas tecnologías apenas se están empezando a implementar, donde algunas empresas han venido desarrollando productos para la elaboración de este tipo de mezclas.

El eje principal de esta investigación se enmarcó en el estudio de las propiedades reológicas del asfalto de Barrancabermeja con penetración 60-70 modificado con dos aditivos químicos: REDISETTM WMXy CECABASE RT[®]. Este ligante fue adicionado con cinco porcentajes diferentes de cada aditivo y a tres temperaturas de modificación. El porcentaje óptimo de aditivo se escogió haciendo uso de la metodología reológica desarrollada por John Casola en el año 2010 para identificar las temperaturas de mezclado y compactación. El principio de esta metodología se basa en el ángulo de fase del asfalto. Los resultados obtenidos en este trabajo indicaron la metodología de Casola no es aplicable a los asfaltos colombianos, por lo que se debe realizar un estudio más detallado con el fin de calibrar los coeficientes del modelo, con el fin de obtener resultados que se ajusten a las temperaturas de mezclado y compactación esperadas para este tipo de ligantes. Sin embargo, y analizando los resultados obtenidos aplicando el modelo de Casola, se pudo inferir los contenidos óptimos de cada aditivo para la modificación de este ligante.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físicas y reológicas de un ligante asfáltico modificado con dos aditivos químicos para mezclas asfálticas tibias.

1.2 Objetivos Específicos

- Determinar el contenido óptimo de aditivo para la modificación de un ligante asfáltico de Barrancabermeja con penetración 60-70.
- Validar la implementación del ensayo de viscosidad a cero cortante (ZVS) con el DSR como referencia para la selección de asfaltos modificados para mezclas asfálticas tibias.
- Comparar las propiedades del ligante 60-70 de referencia (sin modificar) con el ligante modificado con dos aditivos para mezclas asfálticas tibias.

OBJETIVOS

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

El protocolo de Kyoto sobre el cambio climático, el cual fue inicialmente adoptado el 11 de diciembre de 1997 en Kyoto – Japón, acordó reducir las emisiones de seis gases con el fin de hacerle frente al efecto invernadero, el cual está causando el calentamiento global. Estos gases, generados por la actividad humana, son: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), en un porcentaje aproximado de al menos un 5%, dentro del periodo que va desde el año 2008 al 2012, en comparación a las emisiones al año 1990 (Lagos S. and Vélez C. 2010).

En el 1997, en Europa se inició la búsqueda de la implementación de las mezclas asfálticas tibias, año en el que se adoptó el protocolo de Kyoto por la Comunidad Económica Europea, con el fin de lograr una conciencia ambiental sobre una estricta reducción de las emisiones atmosféricas (Calderon 2011).

Las mezclas asfálticas tibias apuntan al tipo de tecnologías que permitan reducir las temperaturas de elaboración y compactación de las mezclas asfálticas convencionales en caliente. Esta reducción oscila entre 90°C a 130°C para el mezclado, y 100°C a 135°C , para la compactación (Hearon and Diefenderfer 2008). Lo anterior es consistente con lo mencionado por (D'Angelo, Harm et al. 2008), donde expone que la temperatura de fabricación de una mezcla tibia se encuentra en un intervalo entre 20°C a 55°C por debajo de la requerida para elaborar mezclas asfálticas en caliente (HMA), esperándose una reducción a largo plazo del 50% (Blades 2009); lo anterior permitirá generar un ahorro en el costo de combustible superior al 40% (Estakhri, Rongji Cao et al. 2009).

Lo anterior ha motivado a los investigadores y entidades estatales a desarrollar mezclas asfálticas en frío, pero su uso se limita solamente a vías con volúmenes de tránsito medianos a bajos (Ministerio de obras públicas de Panamá 2002). Es así como se ha continuado en esta investigación para encontrar tecnologías y/o metodologías que permitan que el ligante asfáltico logre cubrir todo el agregado a menores temperaturas; es decir, que presente una baja viscosidad y que se pueda utilizar para todo tipo de tráfico (Blades 2009).

La utilización de estas tecnologías garantiza la elaboración y puesta en obra de mezclas asfálticas a temperaturas, por lo general, entre 30° C y 50° C (55° F a 85° F) por debajo de las empleadas para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente (HMA) y ligeramente por encima de los 100° C (D'Angelo, Harm et al. 2008), utilizándose los mismos asfaltos y dosificaciones que en una mezcla asfáltica en caliente, empleándose las mismas plantas de mezclado existentes, y conservando la mayor parte de las propiedades mecánicas requeridas para una mezcla asfáltica convencional. Como se muestra en la Figura 1, los beneficios que se logran con una mezcla asfáltica tibia están la reducción en el consumo de energía (lo que se traduce en reducción de costos), reducción considerable en las emisiones de gases asociadas a la fabricación y colocación de la mezcla asfáltica, y facilidad para compactar empleando menos esfuerzos y menor temperatura, obteniendo valores de densidades muy cercanos a la densidad de diseño, lo cual ofrece la posibilidad de obtener mezclas asfálticas de alto desempeño, y facilidad para que la mezcla asfáltica sea transportada a grandes distancias de donde es producida (Biro, Gandhi et al. 2009; Tao, Ni et al. 2009).

Con este fin, a la fecha se han desarrollado diversas tecnologías para modificar el ligante a utilizar en las mezclas asfálticas que se exigen hoy en día. Los modificadores más comunes se dividen en: aditivos a base agua, aditivos orgánicos, tecnologías de secuencia de bitúmenes duros y blandos (Gonzalez,

Lingier et al. 2009), y tecnologías con aditivos químicos (Silva, Oliveira et al. 2010.) .Con la implementación de este tipo de tecnologías más limpias y ambientalmente sostenibles se ha logrado una reducción de CO₂, SO₂, compuestos orgánicos volátiles, CO, NO₂, y cenizas, de 30%-40%, 35%, 50%, 10%-30%, 60-70%, y 20%-25%, respectivamente (Estakhri, Rongji Cao et al. 2009). Las mezclas asfálticas tibias apuntan a este tipo de tecnologías, ya que sus temperaturas de elaboración y compactación oscilan entre 90° C y 130° C, y 100° C y 135° C, respectivamente (Gandhi 2008; You and Goh 2008; Hearon and Diefenderfer 2009; Tao, Ni et al. 2009; Silva, Oliveira et al. 2010.) lo que es consistente con lo mencionado por Biro *et al*, utilizando los mismos asfaltos y dosificación, y conservando las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica convencional. Según You y Goh (2008), el ahorro de energía y la reducción de emisiones durante el proceso de fabricación de mezclas WMA, en comparación con mezclas HMA, es aproximadamente del 30% (ver Figura 1).

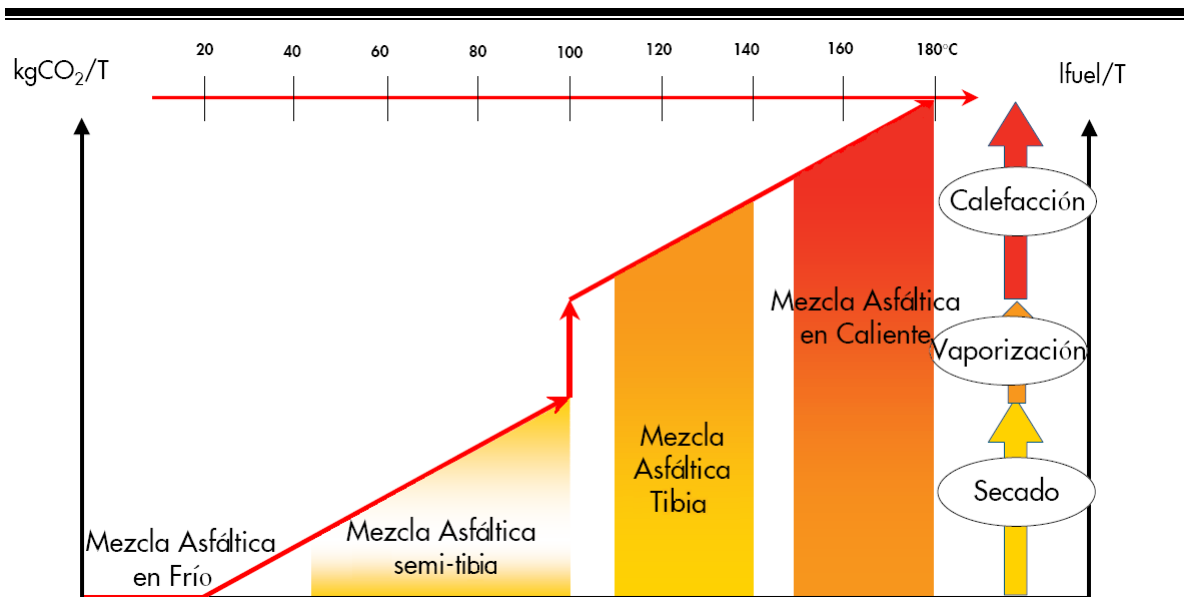


Figura 1 Tecnologías y ventajas medio-ambientales para la producción de Mezclas, Fuente: Olard&Noan, 2007

Algunas de las ventajas en el empleo de las mezclas asfálticas tibias, comparado con la utilización de las mezclas asfálticas calientes, son:

- Extensión y compactación en ambientes más fríos (You and Goh 2008; Hearon and Diefenderfer 2009; Ran, Xu et al. 2010).
- Reducen el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes en planta (You and Goh 2008). Lo anterior generaría que las plantas de producción de mezcla se puedan ubicar en lugares más cercanos a las ciudades (Robjent and Dosh 2009).
- Ahorro en costo de combustibles cercano al 40%; lo cual dependerá del costo del combustible en el país donde se está fabricando la mezcla.
- Reducción del desgaste de las plantas (Hurley and Prowell 2006; Gandhi 2008; Biro, Gandhi et al. 2009).

- Menor oxidación y envejecimiento del ligante asfáltico a corto plazo, debido a las menores temperaturas durante el proceso de fabricación de la mezcla. Lo anterior puede incidir en un aumento en la resistencia a fatiga y al agrietamiento por bajas temperaturas (Gandhi 2008; Estakhri, Rongji Cao et al. 2009; Hearon and Diefenderfer 2009; Robjent and Dosh 2009; Ran, Xu et al. 2010).
- Disminución de la viscosidad del ligante asfáltico (You and Goh 2008), lo cual mejora la trabajabilidad de la mezcla asfáltica, y ofrece la oportunidad de dar una apertura más pronta de la vía pavimentada al tráfico (You and Goh 2008; Estakhri, Rongji Cao et al. 2009; Robjent and Dosh 2009; Tao, Ni et al. 2009).
- La reducción de las temperaturas de mezclado y compactación potencian la utilización de estas mezclas para la construcción de capas asfálticas delgadas (Tao, Ni et al. 2009).
- Ofrece la posibilidad de tener mayores distancias o tiempos de transporte de la mezcla previo a la extensión y compactación (Robjent and Dosh 2009).

Entre las desventajas en el empleo de las mezclas asfálticas tibias, comparada con la utilización de las mezclas asfálticas calientes, se tiene:

- Escaso conocimiento de su comportamiento mecánico y reológico debido a la reciente utilización (Vaitkus, Čygas et al. 2009).
 - Por lo general, las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas WMA son menores en comparación con las de mezclas HMA (Vaitkus, Čygas et al. 2009), las cuales dependen del tipo de aditivo utilizado o del método de fabricación.
-

- En algunas ocasiones, el ahorro de combustibles y energía no se ve compensado por el costo extra que se genera por la producción del ligante y los aditivos necesarios para la mezcla WMA (Biro, Gandhi et al. 2009; Vaitkus, Čygas et al. 2009).

Es importante aclarar que las desventajas aquí listadas que traen consigo las mezclas asfálticas tibias están relacionadas a la insuficiente investigación y una duración relativamente corta de su uso (Vaitkus, Čygas et al. 2009).

Con base en esto, desde el grupo de investigación CECATA de la Pontificia Universidad Javeriana, en el segundo del 2012 se desarrolló un proyecto liderado por Sandra Casanova y Paola Rodríguez titulado “Caracterización física de ligantes asfálticos con CECABASE RT para mezclas tibias”. Esta investigación se centró en presentar los resultados de laboratorio obtenidos de la caracterización física de ligantes asfálticos con diferentes porcentajes del aditivo CECABASE RT® para producir mezclas asfálticas tibias; sin embargo con los procedimientos de caracterización no pudo ser posible identificar un porcentaje óptimo de este producto. Es por esto que en este trabajo de investigación se planteó la implementación de metodologías reológicas que permitan la selección del contenido óptimo de modificador para asfaltos a usarse en mezclas asfálticas tibias.

2.2 TECNOLOGIAS DE ADITIVOS PARA MEZCLAS TIBIAS DE ASFALTO

Como se mencionó anteriormente, actualmente se encuentran disponibles en el mercado diferentes tecnologías para reducir la temperatura de mezclado y compactación en mezclas asfálticas, las cuales van desde sistemas simples que inyectan agua hasta sistemas complicados que involucran cambios costosos en las plantas asfálticas. Estas tecnologías están en función de los procesos y/o de

los productos utilizados, y tienen la cualidad de reducir hasta en un veinte por ciento (20%) las temperaturas a las cuales una mezcla asfáltica en caliente es elaborada y compactada, sin alterar sus características mecánicas (Perkins 2009). Estas tecnologías se clasifican en:

- Procesos que usan agua.
- Procesos que usan agua y aditivos.
- Procesos que usan alguna forma de aditivo químico u orgánico.

Todas estas tecnologías buscan disminuir la viscosidad de la mezcla asfáltica modificando la fluidez del ligante o generando un efecto de espumado en la mezcla. Algunas de las tecnologías encontradas en la literatura para la producción de mezclas asfálticas tibias se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Tecnologías para la producción de Mezclas Asfálticas Tibias

Tecnología/Proceso	Tipo Aditivo	Producto	Fabricante
Generan espuma	A base de agua	Aquablack WMA	Maxam Equipment Inc
Generan espuma	A base de agua	Double Barrel Green®	Astec Industries
Generan espuma	A base de agua	Low Energy Asphalt LEA	Fairco, EIFFAGE Travaux Publics, LEA-CO
Generan espuma	A base de agua	Ultrafoam GX™	Gencor Industries
Generan espuma	-	WAM Foam	Shell Bitumen
Generan espuma	A base de agua	Warm Mix Asphalt System	Terex Roadbuilding
Generan espuma	A base de agua	Green Machine	Gencor Industries
Generan espuma	-	LEAB®	BAM
Generan espuma	Generador de agua	Advera	PQ Corporation
Generan espuma	Generador de agua	Aspha-Min	Eurovia Services, GmbH
Generan espuma	Químico	Low Emission Asphalt	McConnaughay Technologies
Emulsifica el asfalto	Químico	Evotherm®	MeasWestvaco Asphalt Innovations
Emulsifica el asfalto	Químico	CECABASE RT®	Arkema Group
Mejorador de Fluidez	Químico	Rediset™ WMX	Akzo Nobel

MATERIALES Y METODOS

Tecnología/Proceso	Tipo Aditivo	Producto	Fabricante
Mejorador de Fluidez	Orgánico	Sasobit®	SasolWaxAmericas, Inc
Mejorador de Fluidez	Orgánico	Asphantan-B	RomontaGmbH
Mejorador de Fluidez	Orgánico	Licomont BS-100	Clariant International Ltd

Las tecnologías a base de agua con proceso de espuma, siendo de esta tecnología el mayor grupo de aditivos, implica la adición de pequeñas cantidades de agua al bitumen caliente en el proceso de mezclado. En este proceso, una parte de agua se evapora y es atrapada dentro del ligante, generando un gran volumen de espuma que aumenta el volumen del ligante y reduciendo la viscosidad del mismo. Esta tecnología proporciona una energía adicional al sistema logrando un mejor cubrimiento de los agregados (Silva, Oliveira et al. 2010.).

Los aditivos orgánicos, los cuales generalmente están compuestos por ceras, se adicionan al ligante cuando la temperatura de éste sube por encima de la temperatura de fusión de la cera empleada. Estos aditivos usualmente logran que la viscosidad del Ligante baje (European Asphalt Pavement Association EAPA 2010); a medida que la mezcla se enfría, el aditivo se solidifica en partículas de tamaño microscópico y se distribuye uniformemente, aumentando la rigidez del ligante, el cual obtiene un comportamiento similar al de una mezcla reforzada con fibras.

Los aditivos químicos no utilizan espuma, ni reducen la viscosidad del ligante para bajar la temperatura de mezclado y compactación, siendo estos, parte de otro tipo de tecnología diferente a las ya mencionadas. Estos aditivos incluyen agentes emulsificantes, superficiales, polímeros, y aditivos para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, al igual que funcionan como promotores de adhesión, y su cantidad depende directamente del tipo de método que se use (Rubio, Martínez et al. 2012).

Por último, el principio de la tecnología de secuencia de bitúmenes duros y blandos, desarrollada por Shell Bitumen en colaboración de KoloVeidekke en Noruega en el año 1996, es el de añadir a la mezcla componentes duros y blandos para reducir su temperatura de producción. Esta Tecnología, denominada también como WMA-Espuma, es un proceso mas no un aditivo o un material, y ha sido comúnmente utilizada en Noruega para la composición de dos tipos de ligantes asfálticos, uno blando y otro duro, que se combinan para producir un nuevo ligante con el grado de desempeño deseado (D'Angelo, Harm et al. 2008). KoloVeidekke desarrolló aún más esta tecnología añadiéndole espuma al bitumen duro como componente (D'Angelo, Harm et al. 2008).

2.3 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS MATERIALES

2.3.1 Ligante Asfáltico

El ligante asfáltico es un material aglutinante, con el cual se puede trabajar bajo susceptibilidad térmica; por esta razón, el comportamiento de sus propiedades depende de la temperatura con que se trabaje. El comportamiento del cemento asfáltico depende también del tiempo de aplicación de la carga (Speier 1994). Estas dos características se pueden intercambiar como se muestra en la Figura 2.

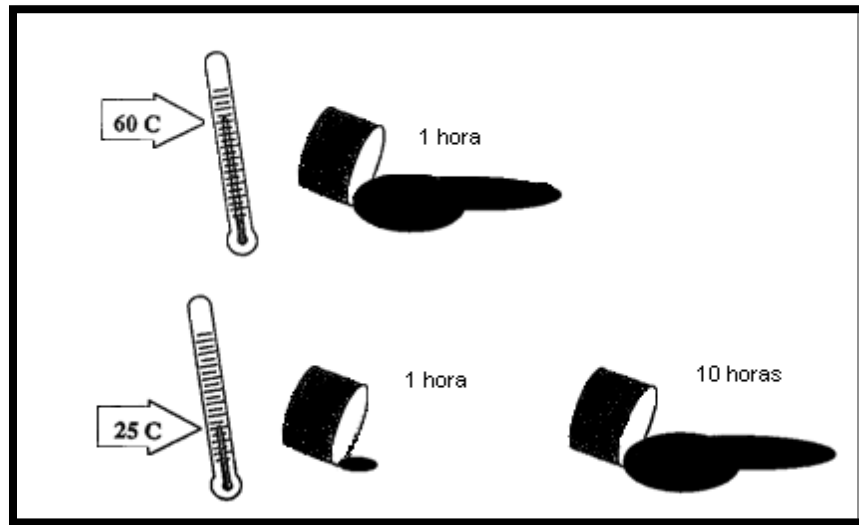


Figura 2 Comportamiento del Cemento asfáltico, bajo características de Temperatura y Tiempo. Fuente: (Speier 1994).

2.3.2 CECABASE RT[®]

Uno de los aditivos utilizados en esta investigación fue CECABASE RT[®], el cual es de tipo químico. CECABASE RT[®] es un producto patentado por CECA, miembro de la compañía ArkemaGroup, y fue desarrollado a principios del año 2000, por el equipo de GillesBarreto en el centro de investigación de Arkema (CRRRA), cerca de Lyon, Francia (Hajj and Cortez 2010). Este aditivo, del cual el 50% de su materia prima es renovable, es un agente de moléculas tenso-activas que actúan en la superficie de contacto entre dos fases (en este caso interactúa entre la interfase ligante-agregado) cambiando la forma en que los minerales interactúan entre ellos; por esta razón, solo se necesita una pequeña cantidad de aditivo (entre un 0.3% y 0.5% por peso del ligante) para recubrir la superficie del agregado (González-León, Caujolle et al. 2011).

Además de las ventajas ya mencionadas en el numeral 2.1, el aditivo CECABASE RT[®] genera otras al ser utilizado en la producción de mezclas asfálticas tibias. Por

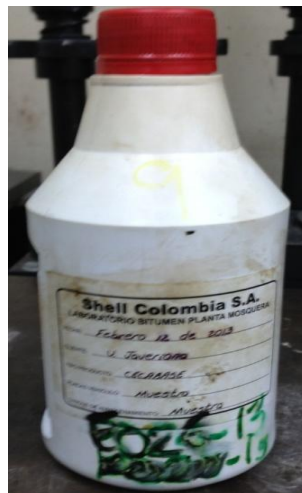
ser un líquido(ver Fotografía 11), es más fácil de mezclar con el ligante y se obtiene una buena homogenización, no se requieren modificaciones en el proceso de producción, y es práctico de usar, pues solo se tiene que adicionar en el tanque de almacenamiento del ligante o directamente en la línea de proceso antes de mezclar el ligante con los agregados, es compatible con todas las clases de asfaltos, y como se mencionó anteriormente solo se necesita de 2 a 6 kg de aditivo para 1 tonelada de ligante, obteniendo reducciones hasta de 40° C en la temperatura de mezclado (CECA ARKEMA GROUP 2008).Es un buen ejemplo de rendimiento, entre los aditivos químicos para mezclas tibias, que ha logrado sorprender a muchos en el mundo por su increíble relación entre la pequeña cantidad de producto frente a la considerable reducción de la temperatura que produce.

Este producto ha alcanzado una alta demanda en el sector de la construcción vial, debido a que el proceso con CECABASE RT[®] ha mostrado reducción en las emisiones y olores contaminantes que generalmente se producen en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente, logrando una significativa mejora en el confort, seguridad y la salubridad en el lugar de trabajo. Como se mencionó, la innovación ofrecida por el CECABASE RT[®] ofrece mejoras en los aspectos relacionados con la salud, ya que logra eliminar emisiones nocivas casi en su totalidad: 90% menos en polvo, vapor y gases durante la producción de la mezcla asfáltica. CECABASE RT[®] no tiene impacto en la clase de ligante o en su reología, además reduce el envejecimiento del mismo cuando se elabora la mezcla. También es importante anotar que en cuanto mayor sea la temperatura de la mezcla, más oxidada se vuelve, y al bajar la temperatura de mezclado CECABASE RT[®] reduce el envejecimiento del ligante y aumenta la vida útil de la vía.

CECABASE RT[®] también reduce significativamente las emisiones, ya que al bajar la temperatura en aproximadamente entre 30°C a 50°C, las emisiones de CO,

CO₂ y NO₂ se reducen en aproximadamente un 35%, y las emisiones de polvo en un 90%.

En 2007, dos años después de su lanzamiento al mercado, 300.000 toneladas de mezcla asfáltica en caliente se produjeron con éxito con la CECABASE RT[®] en Europa. Este aditivo disminuye en un 25% a 35% de gas del consumo de combustible en las plantas de mezcla sin modificar el proceso. Este ahorro es un beneficio clave para los contratistas de construcción de vías debido al considerable aumento en los precios de los hidrocarburos lo cual está impulsando la innovación constante para frenar el gasto de energía. (CECA ARKEMA GROUP 2008). La innovación del CECABASE RT[®] fue premiada en 2007 por el "Pierre Potier" premio presentado por el viceministro francés de Industria quien lo consideró como "un estímulo patente en el avance hacia una verdadera química verde".



Fotografía 1 Presentación producto CECABASE RT[®]

2.3.3 REDISET™ WMX

Como se mencionó en el numeral 2.1, la gran cantidad de proyectos de infraestructura vial ha conducido a la alta emisión de gases de carbono en el proceso de la pavimentación. Es allí donde el uso de procesos de baja energía y la construcción de vías con alta durabilidad inciden considerablemente con el impacto ambiental que dicha actividad genera. El proceso de mezclas tibias de asfalto reduce el consumo de combustible y las altas emisiones de carbono, como vapor o aerosol que se generan en el proceso de pavimentación (Akzo Nobel Surface Chemistry AB 2008).

De esta manera aparece como factor relevante el Rediset™ WMX (ver Fotografía 12), el cual es un aditivo que permite desarrollar el procesamiento de mezclas de asfalto a temperaturas más bajas, y que tiene como característica importante la compactación de las mezclas asfálticas con un alto contenido de asfalto. El

Rediset™ WMX permite mejorar la adherencia del ligante con el agregado, es flexible con la utilización de una gama más amplia de agregados, y proporciona una larga duración a las vías frente a los efectos del tiempo y la humedad (AkzoNobel Surface Chemistry 2011).

De acuerdo con AkzoNobel, entre otras características del Rediset™ WMX se encuentran:

- Mezclas con mayor trabajabilidad y compactación en comparación con otras tecnologías de mezclas tibias.
 - Mejores resultados en bajas temperaturas, inferiores a los 30°C, incluso con difíciles tecnologías de mezclas tales como asfaltos modificados con polímeros y mezclas con grano de caucho reciclado.
-

- Adherencia activa y efecto *antistripping* para permitir niveles de humedad más altos en el agregado.
- Una excelente estabilidad térmica, ya que el ligante puede ser tratado en caliente y almacenado durante dos semanas sin ningún efecto negativo en el rendimiento.
- Una importante versatilidad, ya que se puede trabajar con una amplia gama de asfaltos, agregados, y tipos de mezclas asfálticas.

Rediset™ WMX se puede utilizar para reducir las temperaturas de mezclado y compactación, o únicamente como una ayuda en el proceso de compactación. Su capacidad para mejorar significativamente la compactación se ha demostrado en diversos proyectos en todo el mundo. Es importante aclarar que una compactación de la mezcla en campo por fuera del intervalo especificado por la densidad de diseño puede que lleve a la deformación temprana del pavimento, a los daños por humedad, y a la reducción de su vida útil.

La adición de Rediset™ WMX al ligante cambia las propiedades químicas de la mezcla y hace que sea más fácil para compactar. El aditivo se puede usar como un mejorador de la manejabilidad de la mezcla al momento de la compactación, en dosis pequeñas tales como 1% en peso del ligante o un 0.06% por el peso de la mezcla asfáltica total. Rediset™ WMX ha sido utilizado con éxito como una ayuda en la compactación en mezclas difíciles de compactar.

A continuación se relacionan las principales características que el aditivo mejora en la mezcla asfáltica:

- **Adhesión:** Rediset™ WMX está formulado para mejorar la adhesión entre el agregado y el asfalto y evitar el *stripping*, prolongando así la vida de servicio del pavimento.
- **Adhesión activa:** El agente de adherencia activa contenida en Rediset™ WMX permite la modificación de la mezcla asfáltica para desplazar el agua de la superficie del agregado, permitiendo no sólo el revestimiento del agregado sino también la creación de un enlace químico fuerte entre el agregado y el ligante, resistente a la acción del agua.

Rediset™ WMX es un aditivo sólido en forma de pastillas, y diseñado de tal manera que no tiene un efecto negativo en el ligante en cuanto a sus propiedades a altas y bajas temperaturas (AkzoNobel Surface Chemistry 2011). Rediset™ WMX tiene ingredientes termoestables que han sido comprobados en el laboratorio y en ensayos de campo. Este importante aditivo está diseñado para funcionar con cualquier tipo de asfaltos, agregados y mezclas, así que no es necesario el uso de aditivos diferentes para cada tipo de mezcla asfáltica. Esto ha sido claramente demostrado en proyectos de campo en muchos países alrededor del mundo, donde se han ensayado diferentes combinaciones y grados de asfalto.

Rediset™ WMX no requiere agua para funcionar como una mezcla tibia de asfalto, y por eso, a diferencia de las mezclas de espuma, no pierde su propiedad de mezcla tibia cuando se almacena durante largos períodos de tiempo.

2.4 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

El ligante utilizado en esta investigación para analizar los beneficios de CECABASE RT[®] y REDISET[™] WMX corresponden a un ligante con penetración 60-70 producido por ECOPETROL en la refinería de Barrancabermeja, el cual fue proporcionado por Shell Colombia.

En la Tabla 2 se presentan los ensayos de caracterización que se realizaron para el análisis del ligante sin modificar y modificado. A continuación se presenta una breve descripción de cada ensayo. Los resultados de estos ensayos se presentan en el numeral 4.

Tabla 2 Ensayos de caracterización de ligante asfáltico con penetración 60-70 Fuente. Normas INVIAS (INVIAS I.N.V., 2007).Fuente. Normas INVIAS (INVIAS I.N.V., 2007)

Ensayo de Caracterización	Norma de ensayo
Penetración de los Materiales Asfálticos	INV E-706-07
Gravedad Específica de Materiales Asfálticos Sólidos y Semisólidos (Método del Picnómetro)	INV E-707-07
Punto de Ablandamiento de Materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola)	INV E-712-07
Método para determinar la Viscosidad del Asfalto empleando el Viscosímetro Rotacional	INV E-717-07
Medición de propiedades Reológicas de los ligantes Asfálticos Mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	INV E-750-07

2.4.1 Penetración de los Materiales Asfálticos

La medida de penetración de un ligante se refiere a su consistencia (GROUP, A León et al. 2005). Este ensayo mide la distancia en decimas de milímetro que penetra la aguja el cemento asfáltico durante un tiempo de 5 segundos.

Consiste en calentar en un baño de agua a temperatura controlada un recipiente con cemento asfáltico hasta la temperatura de referencia de 25°C (77°F), siendo esta la temperatura media de servicio. Se apoya una aguja normalizada de 50 g de peso, sobre la superficie del cemento asfáltico durante 5 segundos, tal como se especifica en la norma de ensayo INV E-706-07. La medida de la penetración es la longitud que penetró la aguja en el cemento asfáltico, medida en unidades de 0.1 mm. Los resultados de este ensayo sirven para seleccionar el tipo de ligante adecuado según el clima y el tránsito en la vía.

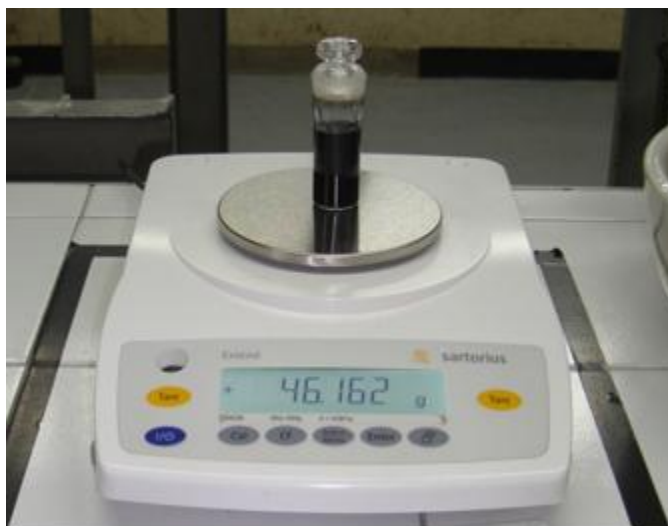


Fotografía 2 Preparación muestras para ensayo de penetración según normas INV E 706-07

2.4.2 Gravedad Específica

La gravedad específica es la relación entre el peso del volumen dado del ligante a 25° C y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura.

La muestra es colocada en un picnómetro calibrado. El picnómetro y la muestra son pesados, luego queda un remanente de volumen el cual es completado con agua. El picnómetro lleno es colocado en un baño a temperatura y se le determina su masa. La densidad de la muestra se calcula considerando la masa de la muestra y la masa del agua desalojada por la muestra en el picnómetro lleno (INV E-707-07).



Fotografía 3 Preparación muestras para ensayo de Gravedad Específica según norma INV E 707-07

2.4.3 Punto de Ablandamiento

Los productos bituminosos son materiales visco-elásticos, por lo que no pueden cambiar de un estado sólido a líquido a una temperatura definida, sino que gradualmente se tornan más blandos y menos viscosos cuando la temperatura incrementa (GROUP, A León et al. 2005). Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario fijo, pero definido de tal forma que produzca resultados reproducibles y comparables.

Se define como punto de ablandamiento a la temperatura que requiere el asfalto para alcanzar cierto estado de fluidez; así se puede conocer el momento en el que un asfalto en estado sólido cambia a estado líquido. Esta temperatura se determina colocando el ligante en un recipiente con agua fría, a una altura de una pulgada sobre el fondo del recipiente; para sostenerlo se utiliza un anillo de latón de dimensiones predeterminadas, el cual se deja enfriar a temperatura ambiente.

Transcurrido un tiempo, se coloca una esfera de 9.51 mm de diámetro y peso de 100 gramos, y se calienta el baño de tal forma que la temperatura del agua incremente de forma constante. Cuando el asfalto se ablanda, la esfera cae suavemente; en el momento en que el ligante con la esfera toque el fondo del recipiente, se registra la temperatura, siendo ésta el punto de ablandamiento. Este ensayo se realizó siguiendo la Norma INV E-712-07.



Fotografía 4Muestras para ensayo de punto de ablandamiento según norma INV E 712-07

2.4.4 Viscosidad Rotacional

La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación debida al rozamiento interno de las moléculas (GROUP, A León et al. 2005). Así entonces, el coeficiente de viscosidad se denomina como la relación entre el esfuerzo cortante aplicado por un vástago y la deformación por corte obtenida. La viscosidad de un ligante asfáltico se determina a temperaturas desde 60° C hasta 200° C; cuanto más elevada sea la temperatura, menor será su viscosidad, y mucho más rápido será su movimiento.

El método de viscosímetro Brookfield, o viscosímetro Rotacional, consiste en efectuar una serie de mediciones de viscosidad mediante un viscosímetro con movimiento rotacional sobre una muestra de ligante asfáltico que tengan propiedades de alta viscosidad y propiedades reológicas dependientes del tiempo.

Este ensayo se realiza para determinar la fluidez del asfalto a determinadas temperaturas. En esta investigación se tomaron siete (6) temperaturas (60° C, 120° C, 135° C, 150° C, 160° C y 170° C), manteniendo constante el tipo de vástago usado (con referencia S-27), y se registró la viscosidad en centiPoises (cP); igualmente se registra la velocidad que alcanza hasta 200 rpm y el torque que disminuye a medida que la temperatura aumenta, como se mostrará más adelante en los resultados. El procedimiento que se siguió se encuentra definido por la norma INV E-717-07.



Fotografía 5 Molde para ensayo de viscosidad Brookfield según norma INV E 717-07



Fotografía 6 Viscosímetro Rotacional según norma INV E 717-07

2.4.5 DSR (Reómetro Dinámico de Corte)

El procedimiento de ensayo en el reómetro de corte directo (DSR por las siglas en inglés de *Dynamic Shear Rheometer*), se usa para medir el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) de los ligantes asfálticos, mediante un reómetro de platos paralelos que mide la respuesta a la deformación por corte del espécimen sometido a un esfuerzo de corte., el comportamiento de los ligantes asfálticos varían en su rigidez (G^* , resistencia total a la deformación) y su elasticidad relativa (δ , distribución de la resistencia entre una parte elástica y una viscosa) (Cuadro C. and Osorio E. 2012).

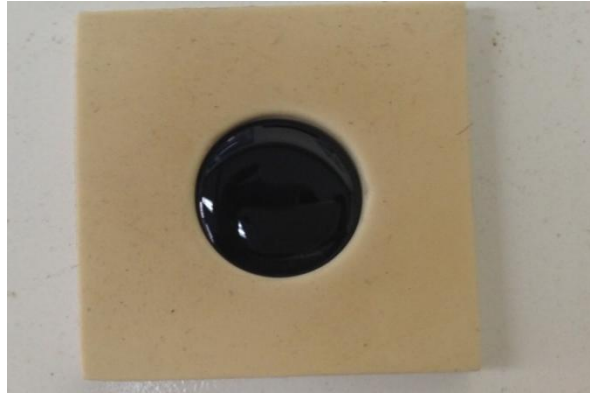
A temperaturas altas, el valor de δ se aproxima a 90° C para todos los asfaltos, lo cual refleja la aproximación al comportamiento viscoso o disipación completa de energía en flujo viscoso, El valor de G^* , sin embargo, varía significativamente, reflejando las diferentes propiedades de consistencia (viscosidad) de los asfaltos

Este ensayo se realiza en un intervalo de temperaturas entre 60° C y 80° C para determinar las propiedades lineales visco-elásticas de los ligantes. Un material es elástico cuando el ángulo de fase igual a cero ($\delta = 0^\circ$), es viscoso cuando es igual a noventa ($\delta = 90^\circ$), y es visco-elástico cuando se encuentra entre estos dos valores, de igual forma a mayores temperaturas el asfalto se comporta como un fluido newtoniano donde su ángulo de fase es muy cercano a 90° (Bahia and Anderson 1995).

Este procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos de la norma INV E-750-07.



Fotografía 7 Reómetro dinámico de corte DSR de la Pontificia Universidad Javeriana



Fotografía 8 Muestras del DSR



Fotografía 9 Almacenamiento Muestras para el DSR

3 MATERIALES Y METODOS

Para este Trabajo de Grado se tuvieron en cuenta las normas de ensayo reglamentadas por el Instituto Nacional de Vías (Invías), y que hacen referencia a la caracterización de un ligante-aditivo.

Con base en esto, a continuación se observan los detalles de los materiales que fueron empleados y la metodología seguida para el cumplimiento de los objetivos.

3.1 Materiales

3.1.1 Ligante Asfáltico

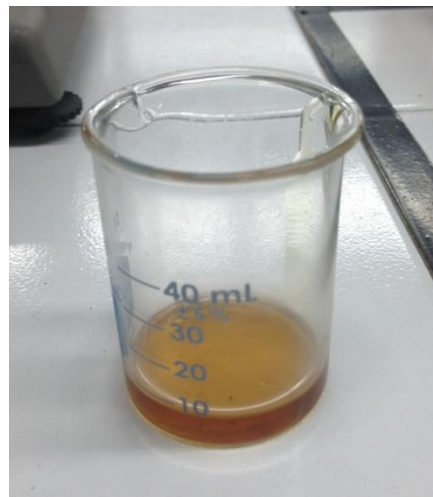
Para este trabajo de grado se utilizó un ligante asfáltico de penetración 60-70 de Barrancabermeja, el cual fue suministrado por la empresa Shell de Colombia. Este ligante asfáltico se caracterizó para conocer el comportamiento y las características físicas y reológicas, tanto en estado original como en estado modificado con los dos tipos de aditivos (CECABASE RT[®] y REDISSET[™] MWX), los cuales fueron adicionados a diferentes porcentajes en función de su peso, y variando las temperaturas de modificación.



Fotografía 10 Almacenamiento ligante asfáltico Barrancabermeja 60-70

3.1.2 Aditivos para mezclas tibias

En esta investigación se estudiaron las propiedades reológicas del asfalto de Barrancabermeja con penetración 60-70 modificado con los aditivos químicos CECABASE RT[®] (ver numeral 2.3.2) y REDISSET[™] WMX (ver numeral 2.3.2). En la Fotografía 11 y la Fotografía 12 se presentan estos aditivos.



Fotografía 11 Presentación producto CECABASE RT[®]



Fotografía 12 Presentación producto Rediset™ WMX

3.2 Métodos

3.2.1 Modificación de Asfalto

El ligante asfáltico que se empleó para esta investigación fue modificado con los dos tipos de aditivos mencionados en el numeral 2.3.

Para obtener el ligante asfáltico modificado se procedió a calentar inicialmente el asfalto original a una temperatura no mayor a 150°C; esto con el fin de no alterar las propiedades del asfalto, ya que puede presentarse oxidación en el ligante; por lo tanto, el asfalto se calentó durante dos (2) horas en un horno del laboratorio, llegando a la temperatura deseada para cada tipo de porcentaje determinado según el tipo de aditivo.

El asfalto, una vez caliente, fue posteriormente vertido en un molde que contiene el equipo modificador. La modificación se realizó a una velocidad constante de 3000 rpm (ver Tabla 3) en el equipo “K ultra- TURRAX T50 BASIC IKA-WERKE” usado para la modificación de todo tipo de asfaltos (ver Fotografía 13).

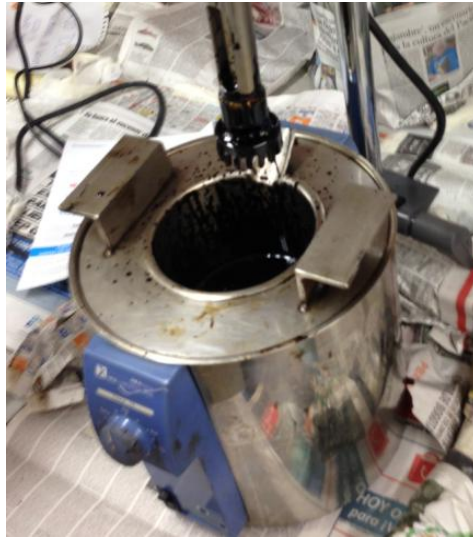
Tabla 3 Características del equipo K ultra- TURRAX T50 BASIC IKA-WERKE

Parámetros del equipo	Valor
Peso del molde (g)	1476.8
Velocidad de mezclado (rpm)	3000
Temperaturas de mezclado (°C)	0 – 250° C

Con base en lo encontrado en la literatura referente a cada aditivo, se hizo el procedimiento de modificación escogiendo un intervalo de temperaturas (125° C, 145° C, 165° C) para evaluar el comportamiento de estos aditivos; del mismo modo, se calculó el porcentaje de aditivo con relación al peso del asfalto original.



Fotografía 13 Equipo modificador- K ULTRA-TURRAX® T50 Basic IKA®- WERKE



Fotografía 14 Rodillo del equipo modificador



Fotografía 15 Procedimiento de mezclado con REDISSET™ WMX

3.2.2 DSR (Reómetro de Corte Dinámico)

En el equipo “Reómetro de Corte Dinámico TA INSTRUMENTS – AR- 2000EX” (ver Fotografía 16) se realizó el procedimiento TTS (Temperatura - Tiempo - Superposición). En el equipo se permite evaluar las propiedades del ligante asfáltico a diferentes temperaturas (altas y muy bajas) con varios procedimientos, de los cuales se puede determinar el comportamiento según el tipo de tráfico (Bahia and Anderson 1995).

En el equipo DSR se usó la geometría de platos paralelos de 25 mm que es usada para deformaciones del 12% para asfaltos originales. El equipo hace una rotación de forma sinusoidal de un plato respecto al otro, donde el cemento asfáltico se encuentra intercalado entre el plato inferior y el plato de la aguja (plato superior), el cual está sujeto a esfuerzos y deformaciones alternadas. El equipo puede ser controlado por esfuerzo o por deformación, dependiendo de cuál variable se quiera determinar por el dispositivo de prueba y la rutina que se quiera realizar (Anderson, Christensen et al. 1991).

En la rutina TTS se evaluó el comportamiento del ángulo de fase (δ , en grados) y el módulo complejo de deformación (G^* , en Pa) respecto al barrido de frecuencia angular (ω , en rad/s) entre 0.1 rad/s y 100 rad/s, para tres temperaturas (60°C, 70°C y 80°C). El ángulo de fase indica el desfase en la respuesta al esfuerzo, comparada con la tensión aplicada; por otro lado, el módulo complejo se define como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, y tiene dos componentes: una elástica recuperable y otra viscosa no recuperable. Para materiales puramente elásticos, el ángulo de fase puede ser 0°, mientras que para materiales puramente viscosos que se comportan como fluidos newtonianos el ángulo es de 90°. Por lo tanto, el ángulo de fase es un parámetro importante para describir las propiedades visco-elásticas de un ligante asfáltico modificado (Bahia, Anderson et al. 1992).



Fotografía 16 Equipo DSR

3.2.3 Curva Maestra

Las propiedades visco-elásticas son las funciones de tiempo y temperatura. En ocasiones, es difícil medir estas propiedades durante mucho tiempo a una temperatura dada. Afortunadamente, la mayoría de carpetas asfálticas son consideradas reológicamente “térmicas simples”, que quiere decir que el efecto de tiempo sobre las propiedades de los materiales puede ser sustituido por el efecto de temperatura, y viceversa. En otras palabras $E(t_1, T_1) = E(t_2, T_2)$, donde t_2 es más alto que t_1 , y T_2 es inferior que T_1 , como se ilustra en la Figura 3. Por lo tanto, si el módulo de relajación (G_t) es necesario en una temperatura baja T_2 , y un tiempo de carga muy largo t_2 , uno puede aumentar la temperatura a T_1 y disminuir el tiempo que carga a t_1 para obtener el mismo módulo. Estas características son importantes para obtener las propiedades visco-elásticas de los materiales en una amplia gama de temperaturas y diferentes cargas. La superposición de temperaturas por cada tiempo es aplicada a las medidas experimentales de las propiedades visco-elásticas del ligante (módulo de relajación y módulo dinámico) en un barrido de temperaturas y de carga (o frecuencias) para obtener dos relaciones:

- Una curva maestra que describe la propiedad visco-elástica en una temperatura de referencia y sobre una gama de tiempo o frecuencia en el caso de esta investigación de hizo varias corridas para varias frecuencias. (0.1 ras/s – 100 rad/s).
- Una curva de temperatura de función de cambio que describe la proporción entre el tiempo real en que la prueba fue conducida y el tiempo de referencia la cual va variando contra la temperatura en el tiempo real.

La curva maestra permite la valoración de propiedades mecánicas sobre una amplia gama de temperaturas o frecuencias, que podría ser realizado en el campo, pero no es práctico para simular en el laboratorio. El concepto de establecer la curva maestra y funciones de cambio es ilustrado asumiendo que el módulo sigue una ley de poder simple (Ecuación 1):

$$E t = E_1 - m$$

Ecuación 1

En forma de una función lineal:

$$\text{LOG } E t = \log E_1 - m \log t$$

Ecuación 2

Si el módulo es conducido en temperaturas diferentes, las curvas mostradas en la Figura 3 y Figura 4 serán producidas; estas figuras pueden ser cambiadas horizontalmente a una temperatura de referencia T_2 con un *shift factor* (ver Figura 5), que causa la curva (ver Figura 4). Finalmente después del desplazamiento de las curvas se obtiene la curva maestra para los datos obtenidos para cada temperatura de superposición.

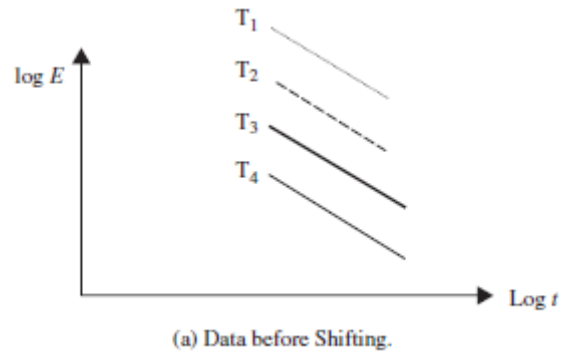


Figura 3 Curvas antes de realizar superposición

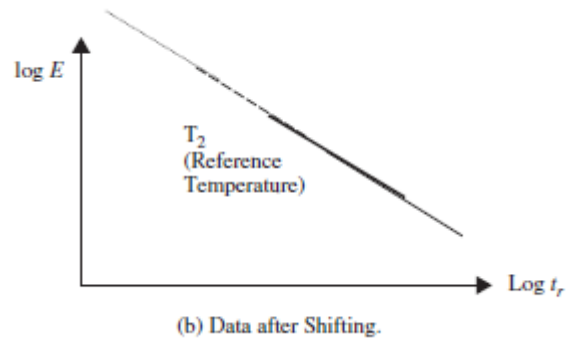


Figura 4 Procedimiento después de realizar desplazamiento a una temperatura de desplazamiento para el desarrollo del TTS

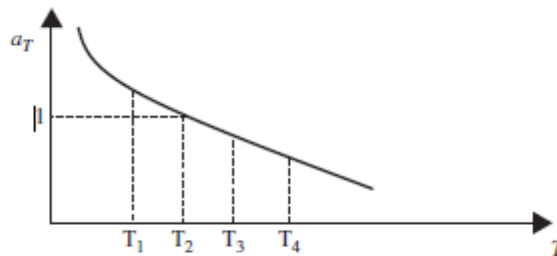


Figure 5.11
Shift Factor versus Temperature

Figura 5 Gráfica de curva maestra en el DSR SHIFT factor

Por muchos años, la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto se han basado en el principio de equi-viscosidad. Dicho principio se basa en la determinación de la viscosidad a varias temperaturas, donde posteriormente se calcula la temperatura asociada a ciertas viscosidades que históricamente se han definido como adecuadas para el mezclado (0.17 Pa·s) y la compactación (0.28 Pa·s) de la mezcla asfáltica (Asphalt Institute 2006) partiendo de la base que los mismos se comportan como fluidos Newtonianos a temperaturas elevadas con independencia entre la viscosidad y la velocidad de corte. En el caso de los asfaltos modificados los mismos presentan viscosidades mucho más elevadas que los convencionales, por lo que teóricamente sería necesario elevar considerablemente la temperatura de mezclado para lograr tanto un correcto recubrimiento de los agregados como una correcta colocación y compactación de la mezcla. Estas elevadas temperaturas podrían causar algún daño en las propiedades de los mismos. No obstante, las temperaturas que este método sugiere para asfaltos modificados son generalmente muy altas, lo que puede llegar a ocasionar oxidación en el asfalto (Aguiar Moya, Villegas Villegas et al. 2012). Debido a esto, a nivel mundial se han desarrollado varias metodologías reológicas que pretenden identificar dichas temperaturas para asfaltos modificados o sin modificar. Una de estas metodologías se basa en el ángulo de fase y ha demostrado ser apropiada para la determinación de las temperaturas de mezclado y compactación para una amplia gama de asfaltos (Aguiar Moya, Villegas Villegas et al. 2012).

De acuerdo a esto, en el presente trabajo de grado se pretende desarrollar una curva maestra para cada uno de los asfaltos (originales y modificados). Para realizar esto, se evaluó el mismo asfalto modificado con los dos tipos de aditivos mezclados a diferentes temperaturas, se corrieron barridos de frecuencia a varias temperaturas con el fin de obtener la curva maestra para cada muestra y determinar temperaturas de mezclado y compactación óptimas evaluando la curva viscosidad-temperatura en laboratorio tomando los límites convencionales de

viscosidad para asfaltos no modificados.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este trabajo, se realizó la modificación del ligante asfáltico con un porcentaje de 0.2 % al 1% para CECABASE RT[®], y para REDISET[™] WMX con porcentajes de 0.5% al 2%. Estos porcentajes fueron determinados de acuerdo a la investigación previa respecto al estado del arte de los aditivos y se decidió realizar un rango de porcentajes para evaluar los cambios que puede producir la variación de cantidad de aditivo en el asfalto, para el aditivo CECABASE el contenido optimo del aditivo con respecto al peso del asfalto es de 0.5% a 1% y para REDISET de 0.5% a 2% con respecto al peso del asfalto; dentro de esta recopilación de información no se encontró referencia alguna con relación a las temperaturas a la que se debía modificar el ligante asfáltico con cada aditivo. Esta temperatura es importante conocerla debido a que puede afectar la consistencia de la mezcla asfáltica; es por esto que en la etapa de modificación del ligante se determinó llevar a cabo esto con tres temperaturas diferentes para evaluar su comportamiento 125° C, 145° C, y 165° C.

4.1 MODIFICACION DE ASFALTO BARRANCABERMEJA 60-70 CON ADITIVO CECABASE RT[®] Y ADITIVO REDISET[™]WMX

4.1.1 MODIFICACIÓN REDISET[™]WMX

Al modificar el ligante con este aditivo se pudo observar acumulación de partículas del mismo en el fondo del recipiente del equipo, cuando éste fue modificado a la temperatura más baja (125° C); esto pudo haberse presentarse debido a la baja temperatura de modificación, impidiendo que las partículas se disolvieran completamente en el ligante.

En la Tabla 4 se indican las temperaturas a las cuales se mezcló cada porcentaje del aditivo REDISET™ WMX con el ligante asfáltico. Para cada muestra modificada se asignó un código según su dosificación y la temperatura de mezclado; de tal forma que estas se pudieran diferenciar en el momento de realizar los ensayos de laboratorio.

Tabla 4 Datos de la modificación del ligante Asfáltico con el aditivo REDISET™ WMX.

REF	TEMPERATURA	REDISET™ WMX	PESO	Asfalto / aditivo
	°C	%	gr	gr
RT-0.5-125	125	0,5	757,7	3,8
RT-0.5-145	145	0,5	740	3,7
RT-0.5-165	165	0,5	745	3,7
RT-1-125	125	1	550	5,5
RT-1-145	145	1	420	4,2
RT-1-165	165	1	521,5	5,2
RT-1.5-125	125	1,5	560,6	8,4
RT-1.5-145	145	1,5	0	0,0
RT-1.5-165	165	1,5	566,5	8,5
RT-2-125	125	2	461,9	9,2
RT-2-145	145	2	537	10,7
RT-2-165	165	2	478	9,6
RT-2.5-125	125	2,5	380,3	9,51
RT-2.5-145	145	2,5	332,3	8,31
RT-2.5-165	165	2,5	469,5	11,74

4.1.2 Modificación CECABASE RT®

En la Tabla 5 se indican las temperaturas a las cuales se mezcló cada porcentaje del aditivo CECABASE RT® con el ligante asfáltico. Para cada muestra modificada se asignó un código según su dosificación y la temperatura de mezclado; de tal forma que estas se pudieran diferenciar en el momento de realizar los ensayos de laboratorio.

Tabla 5 Datos de la modificación del ligante Asfáltico con el aditivo CECABASE RT®

REF	TEMPERATURA	CECABASE RT®	PESO	Asfalto / aditivo
	°C	%	gr	gr
CB-0.2-125	125	0,2	457,8	0,92
CB-0.2-145	145	0,2	541,1	1,08
CB-0.2-165	165	0,2	550	1,10
CB-0.4-125	125	0,4	320,1	1,28
CB-0.4-145	145	0,4	591,8	2,37
CB-0.4-165	165	0,4	461,3	1,85
CB-0.6-125	125	0,6	333,1	2,00
CB-0.6-145	145	0,6	409	2,45
CB-0.6-165	165	0,6	464,2	2,79
CB-0.8-125	125	0,8	376	3,01
CB-0.8-145	145	0,8	438	3,50
CB-0.8-165	165	0,8	416,8	3,33
CB-1-125	125	1	304	3,04
CB-1-145	145	1	538,7	5,39
CB-1-165	165	1	236	2,36

4.2 CURVAS ORIGINALES DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO REDISSET™WMX

A modo de ejemplo, en la Figura 6 y la Figura 7 se presenta el comportamiento del ángulo de fase (δ , en grados) contra la frecuencia angular (ω , en rad/s), y el comportamiento del módulo complejo de corte ($|G^*|$, en Pa) contra la frecuencia angular (ω , en rad/s), para las tres temperaturas de ensayo (60° C, 70° C, y 80 °C), y para la muestra RT-2%-145 modificada con REDISSET™ WMX. Las gráficas del comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para todas las muestras ensayadas, se presentan en el ANEXO A en estas graficas se pudo observar que la adición de aditivo a un mayor porcentaje afecto el ángulo de fase reduciéndolo unos 10° por debajo del comportamiento de las demás muestras ; y las gráficas del comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para todas las muestras ensayadas, se presentan en el ANEXO B.

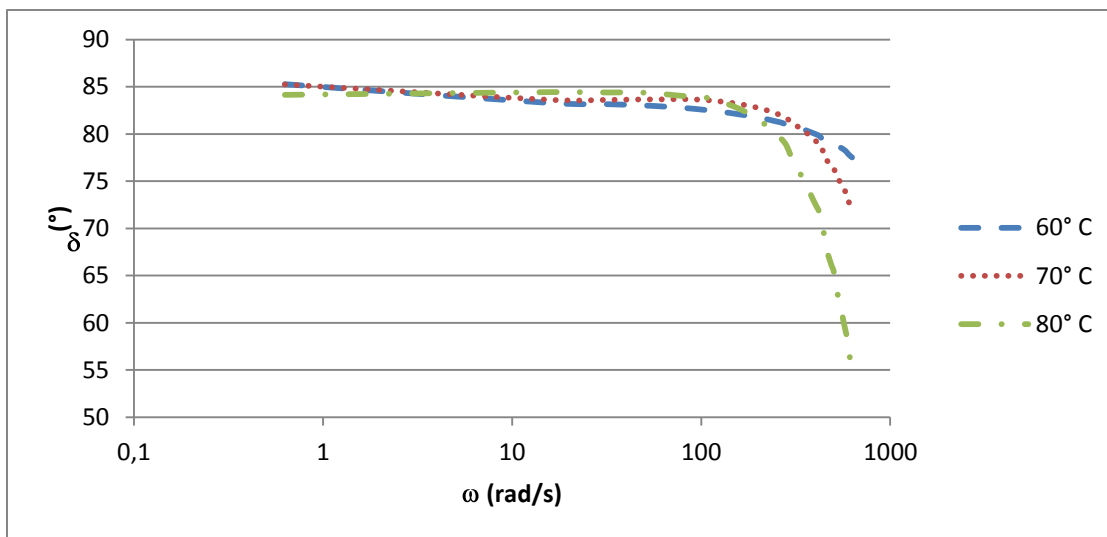


Figura 6. Comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para la muestra RT-2%-145° C

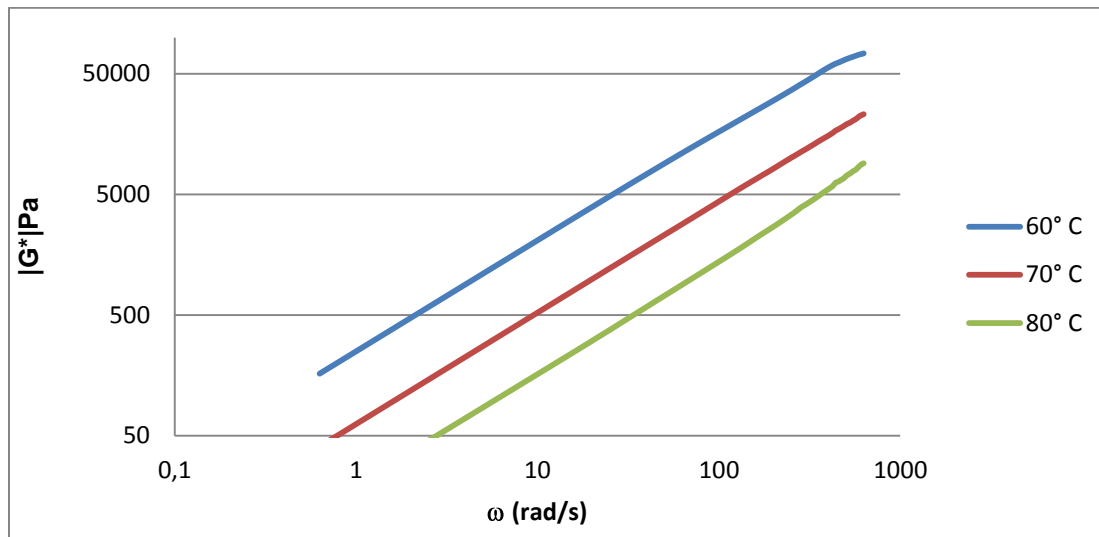


Figura 7. Comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para la muestra RT-2%-145° C

4.3 CURVAS ORIGINALES DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO CECABASE RT®

A modo de ejemplo, en Figura 8 y Figura 9 se presenta el comportamiento del ángulo de fase (δ , en grados) contra la frecuencia angular (ω , en rad/s), y el comportamiento del módulo complejo de corte (G^* , en Pa) contra la frecuencia angular (ω , en rad/s), para las tres temperaturas de ensayo (60° C, 70° C, y 80° C), y para la muestra CB-0.6%-165 modificada con CECABASE RT®. Las gráficas del comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para todas las muestras ensayadas, se presentan en el ANEXO A para este aditivo se pudo observar que todas graficas realizadas para cada porcentaje se comportaron de la misma forma y no hubo una variación significativa; y las gráficas del comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para todas las muestras ensayadas, se presentan en el ANEXO B, al igual que las gráficas del ángulo de fase contra frecuencia angular en las del módulo complejo

todas las muestras tienen el mismo comportamiento y misma reacción de deformación al corte.

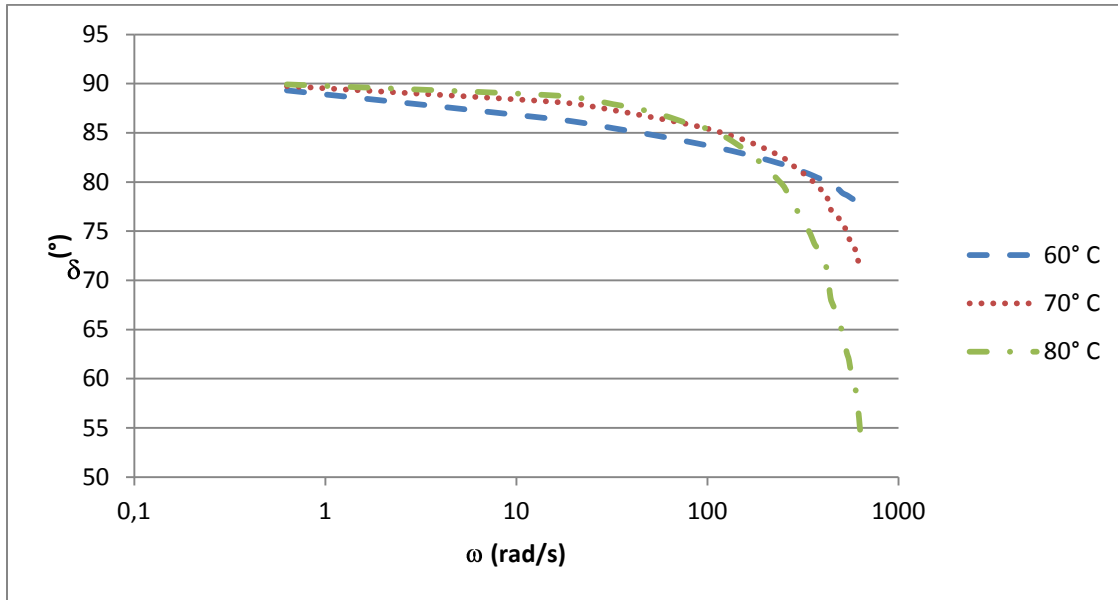


Figura 8. Comportamiento del ángulo de fase contra la frecuencia angular, para la muestra CB-0.6%-165° C

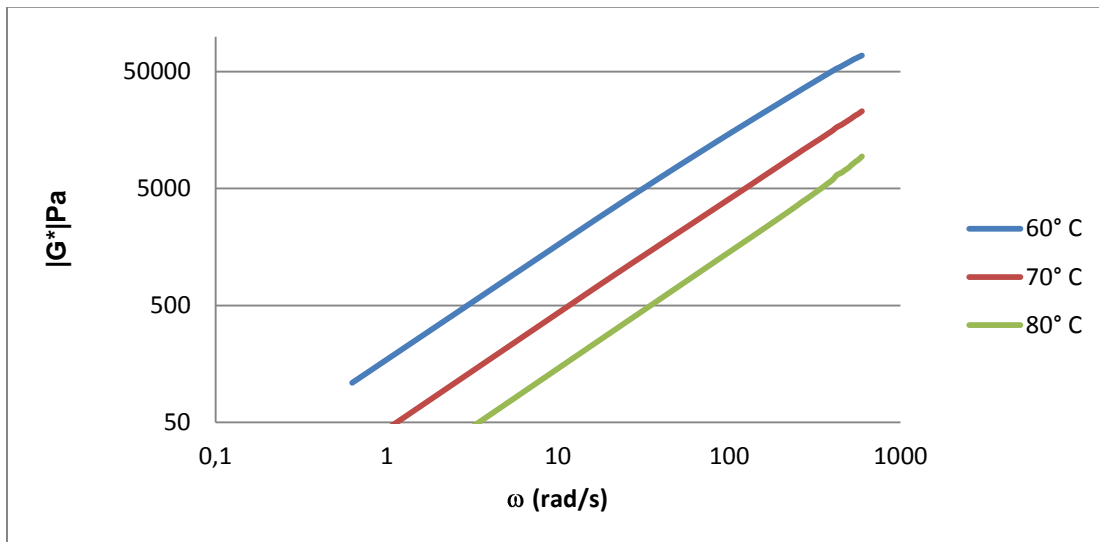


Figura 9. Comportamiento del módulo complejo de corte contra la frecuencia angular, para la muestra CB-0.6%-165° C

4.4 CURVA MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA EL ASFALTO ORIGINAL

Para la realización de las curvas maestras se aplicó un factor de desplazamiento en el eje de la abscisa (frecuencia angular ω), con el fin de sobreponerlos datos y poder determinar esta curva; la temperatura de referencia utilizada fue de 80° C.

En la Figura 10 se presenta la curva maestra para el asfalto sin modificar (asfalto Barrancabermeja con penetración 60-70). Las curvas maestras para todas las muestras se presentan en el ANEXO C.y ANEXO D

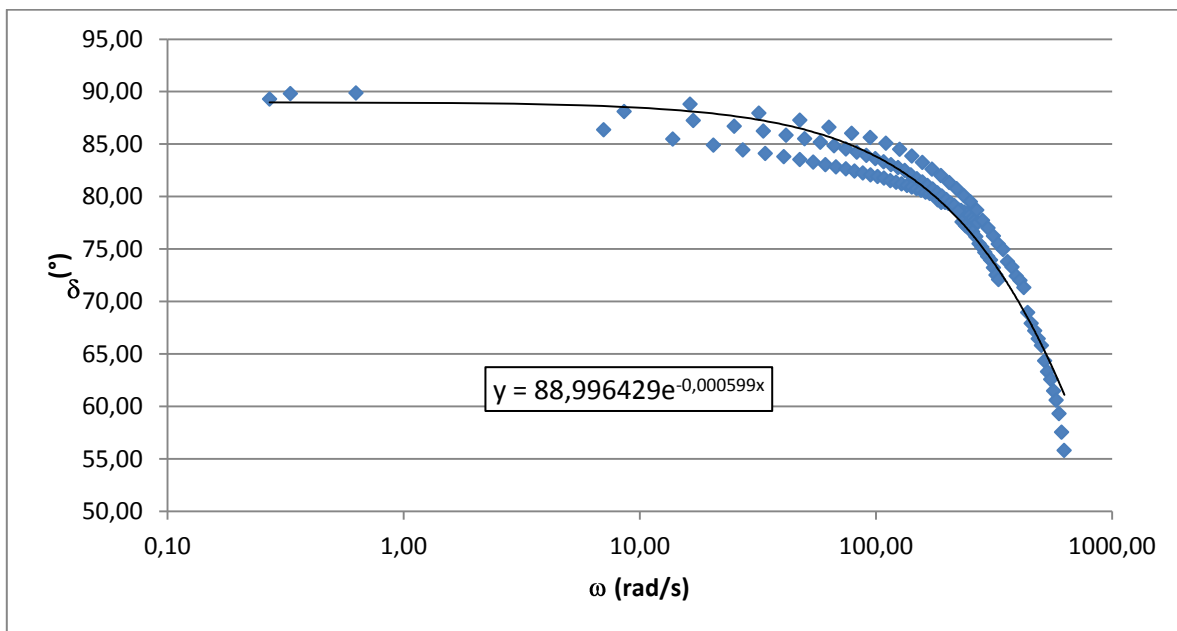


Figura 10. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular asfalto original (Barrancabermeja con penetración 60-70)

Después de realizar el proceso de desplazamiento de las curvas, se determinó la línea de tendencia a la que mejor se ajustara con la cual se determina la curva maestra. De acuerdo con la metodología reológica propuesta por Casola, con un ángulo de fase de 86° se encuentra la frecuencia angular para cada ligante, el cual

será utilizado más adelante (numeral 4.7), para determinar la temperatura de mezclado de cada ligante, y con estas temperaturas definir el contenido óptimo de aditivo.

4.5 CURVAS MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICION) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO CECABASE RT[®]

Para la realización de las curas maestras del ligante modificado con diferentes porcentajes de CECABASE RT[®], se realizó el mismo procedimiento descrito en el numeral 4.4.

En la Figura 11, a modo de ejemplo, se presenta la curva maestra para el asfalto modificado con CECABASE RT[®] (muestra CB-0.6%-165° C). Las curvas maestras para todas las muestras se presentan en el ANEXO C.

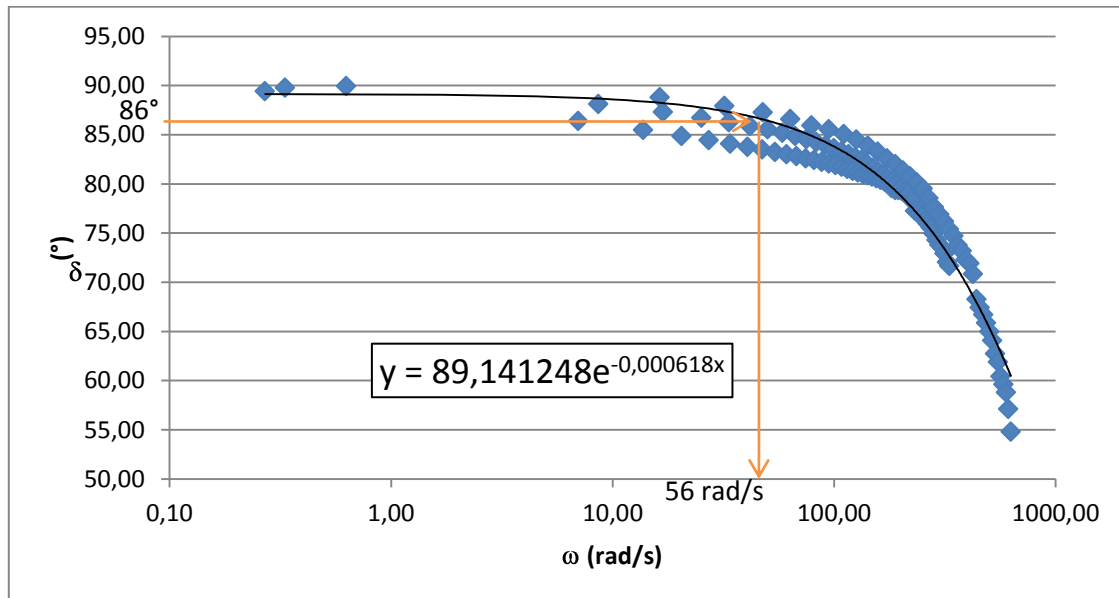


Figura 11. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular para el asfalto modificado con CECABASE RT[®](muestra CB-0.6%-165)

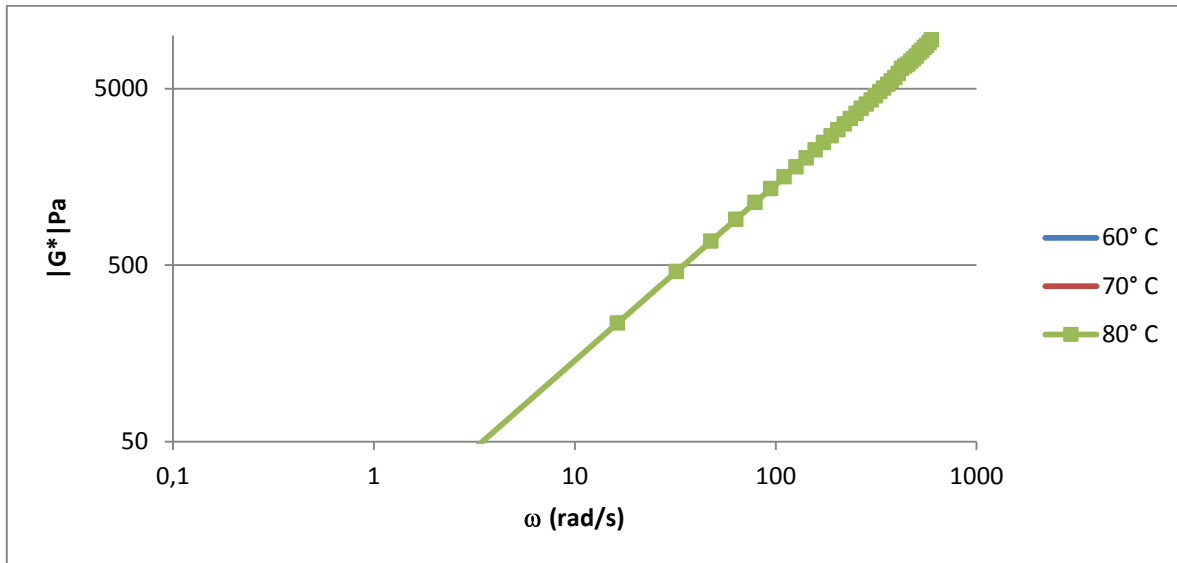


Figura 12. Curva maestra de modulo complejo contra frecuencia angular para el asfalto modificado con CECABASE RT®(muestra CB-0.6%-165)

Después de realizar el proceso de desplazamiento de las curvas, se determinó la línea de tendencia con la cual se determina la curva maestra. La frecuencia angular (ω) a una temperatura de 86° C se determinó con el procedimiento descrito en el numeral 4.4. En la Tabla 6 se presentan los valores de frecuencia angular (ω , en rad/s) para diferentes temperaturas de modificación (125° C 145° C, 165° C), la frecuencia angular fue determinada a partir de las curvas maestras correspondientes, para un ángulo de fase de 86°, en los ligantes modificados con CECABASE RT®

Tabla 6. Resultados frecuencia angular (ω , en rad/s) para un ángulo de fase de 86°, en los ligantes modificados con CECABASE RT®

% de aditivo	Temperatura de modificación (° C)		
	125	145	165
0.2	62.06	74.19	57.17
0.4	56.91	59.27	53.57
0.6	57.85	60.21	58.08
0.8	60.52	58.81	53.92
1.0	89.58	62.03	54.67

4.6 CURVAS MAESTRAS DE TTS (TEMPERATURA-TIEMPO Y SUPERPOSICIÓN) PARA CADA ASFALTO MODIFICADO REDISET™ WMX

Para la realización de las curvas maestras del ligante modificado con diferentes porcentajes de REDISET™ WMX, se realizó el mismo procedimiento descrito en el numeral 4.4.

En la Figura 13, a modo de ejemplo, se presenta la curva maestra para el asfalto modificado con de REDISET™ WMX (muestra CB-0.6%-165° C). Las curvas maestras para todas las muestras se presentan en el ANEXO C.y ANEXO D.

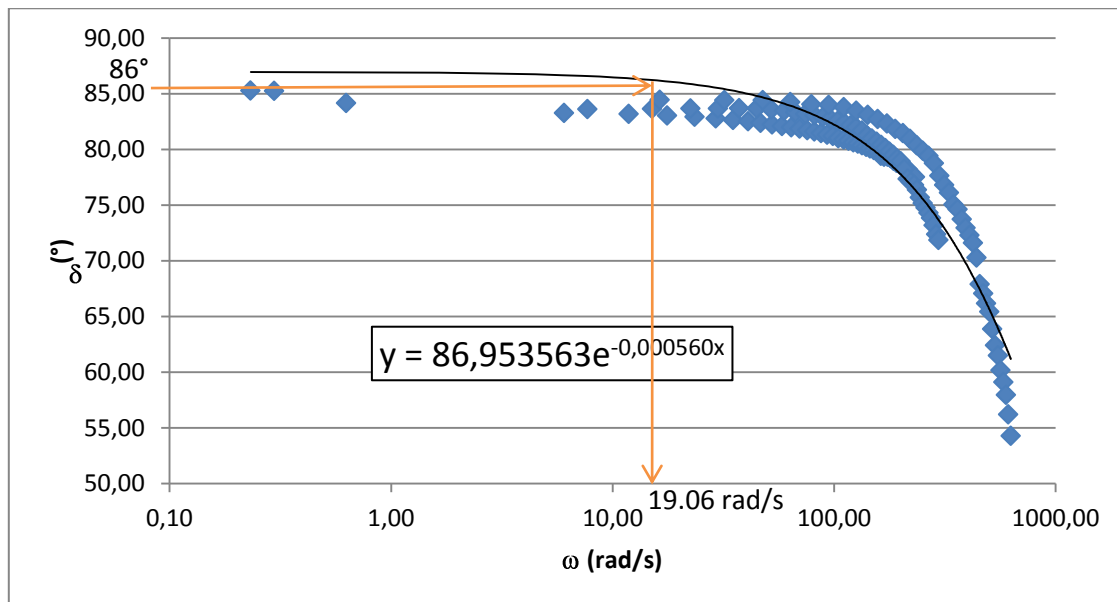


Figura 13. Curva maestra de ángulo de fase contra frecuencia angular para el asfalto modificado con REDISET™ WMX (muestra RT-2%-145° C)

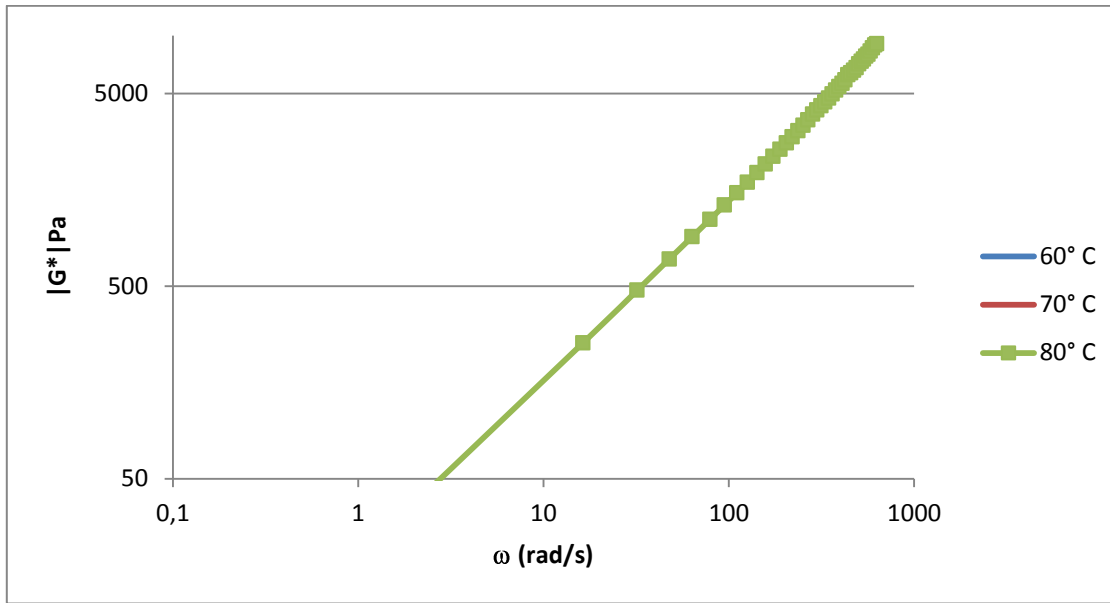


Figura 14. Curva maestra de modulo complejo contra frecuencia angular para el asfalto modificado con REDISET™ WMX (muestra RT-2%-145° C)

Después de realizar el proceso de desplazamiento de las curvas, se determinó la línea de tendencia con la cual se determina la curva maestra. La frecuencia angular (ω) a una temperatura de 86° C se determinó con el procedimiento descrito en el numeral 4.4, como ejemplo en la Figura 13 se puede ver que para un ángulo de fase de 86° para esta muestra la frecuencia angular es de 19.06 reportada en la Tabla 7. En la Tabla 7 se presentan los valores de frecuencia angular (ω , en rad/s) para diferentes temperaturas de modificación (125° C 145° C, 165° C), la frecuencia angular fue determinada a partir de las curvas maestras correspondientes, para un ángulo de fase de 86°, en los ligantes modificados con REDISET™ WMX.

Tabla 7. Resultados frecuencia angular (ω , en rad/s) para un ángulo de fase de 86° , en los ligantes modificados con REDISET™ WMX

% de aditivo	Temperatura de modificación ($^\circ$ C)		
	125	145	165
0.5	64.52	72.63	68.67
1	62.38	54.55	59.55
1.5	21.99	38.61	58.57
2	63.15	19.06	46.087
2.5			

4.7 CONTENIDO ÓPTIMO DE ADITIVO EN EL ASFALTO

4.7.1 Modelo de ángulo de fase de Casola

Para determinar el contenido óptimo de cada aditivo, se escogió la metodología de John Casola (Aguiar Moya, Villegas Villegas et al. 2012). Desarrolló modelos de ecuaciones para determinar la temperatura de mezclado y compactación para asfaltos originales y asfaltos modificados, basado en el principio de equi-viscosidad; esta metodología se basó en la variación del ángulo de fase del asfalto. Sin embargo, en la revisión bibliográfica adelantada en esta investigación no se encontró claridad en el proceso de cómo estas ecuaciones de temperatura de mezclado y compactación fueron desarrolladas.

Las ecuaciones del modelo de Casola para determinar las temperaturas de mezclado y compactación están en función de la frecuencia angular (ω) determinada de la curva maestra del ligante para un ángulo de fase (δ) igual a 86° ; la curva maestra se determina a partir de los resultados obtenidos mediante el ensayo de Reómetro Dinámico de Cortante (DSR).

El ángulo fase (δ) determina el comportamiento visco-elástico del asfalto; de esta manera se puede identificar si el asfalto se comporta como material visco-elástico o es realmente viscoso. El ángulo de fase (δ) puede estar dentro de los intervalos

de $\delta = 85^\circ$ y los $\delta = 90^\circ$; intervalo en el cual se puede observar el comportamiento reológico de los asfaltos.

Para determinar la frecuencia angular se deben realizar las pruebas en el DSR que involucran barridos de frecuencia, y a tres (3) diferentes temperaturas (60° C , 70° C , y 80° C). Para la construcción de la curva maestra se tomó como referencia la temperatura de 80° C , pues a esta temperatura se puede observar la variación del ángulo fase en los asfaltos modificados (Aguiar Moya, Villegas Villegas et al. 2012).

Los modelos de Casola se basan en leyes de potencia, y fueron determinados mediante regresión usando las temperaturas de mezclado y compactación recomendadas para distintos grados de desempeño. La determinación de las ecuaciones se realizó mediante la calibración de los modelos, y son las presentadas a continuación:

$$T_{mezclado} (\text{° F}) = \beta_1 \omega^{\beta_2} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$T_{compactación} (\text{° F}) = \beta_3 \omega^{\beta_4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde β_1 , β_2 , β_3 , y β_4 son factores de correlación determinados por Casola, y son iguales a:

Tabla 8. Valores de los parámetros de calibración del modelo de Casola

Parámetro	Valor
β_1	325
β_2	-0.0135
β_3	300
β_4	-0.012

4.7.2 Contenido óptimo de CECABASE RT®

En la Tabla 9 se presentan los valores de temperatura de mezclado y en la Tabla 10 la temperatura de compactación, para cada porcentaje de aditivo CECABASE RT®, determinados a partir del modelo de ángulo de fase de Casola (Ecuación 3). en la Figura 15 se presenta la reducción en las temperaturas de mezclado de cada muestra modificada, es por esto que el contenido optimo es el ligantes asfáltico modificado con un porcentaje de 1% a una temperatura de 125° C este fue escogido por ser el que más bajo la temperatura de mezclado y compactación, sin embargo la reducción equivale a 3 ° C comparándolo con las demás muestras. De igual forma en las curvas maestras presentadas en el numeral 4.5 las curvas maestras del ángulo de fase(δ°) y las del módulo complejo no se presenta una variación significativa para cada ligante modificado, de igual forma el comportamiento del ángulo de fase estuvo entre el rango de 85° a 90° donde se evalúa el comportamiento visco-elástico del asfalto.

Tabla 9. Temperatura de mezclado para cada porcentaje de aditivo CECABASE RT®

% de aditivo	Temperatura de modificación (° C)		
	125	145	165
	Temperatura de mezclado		
0.2	153.0	152.6	153.2
0.4	153.2	153.1	153.3
0.6	153.2	153.1	153.1
0.8	153.0	153.1	153.3
1	152.1	153.0	153.3

Tabla 10. Temperatura de compactación para cada porcentaje de aditivo CECABASE RT®

% de aditivo	Temperatura de modificación (° C)		
	125	145	165
	Temperatura de compactación		
0.2	139.13	139.13	139.12
0.4	139.12	139.12	139.12
0.6	139.12	139.12	139.12
0.8	139.13	139.12	139.12
1	139.14	139.13	139.12

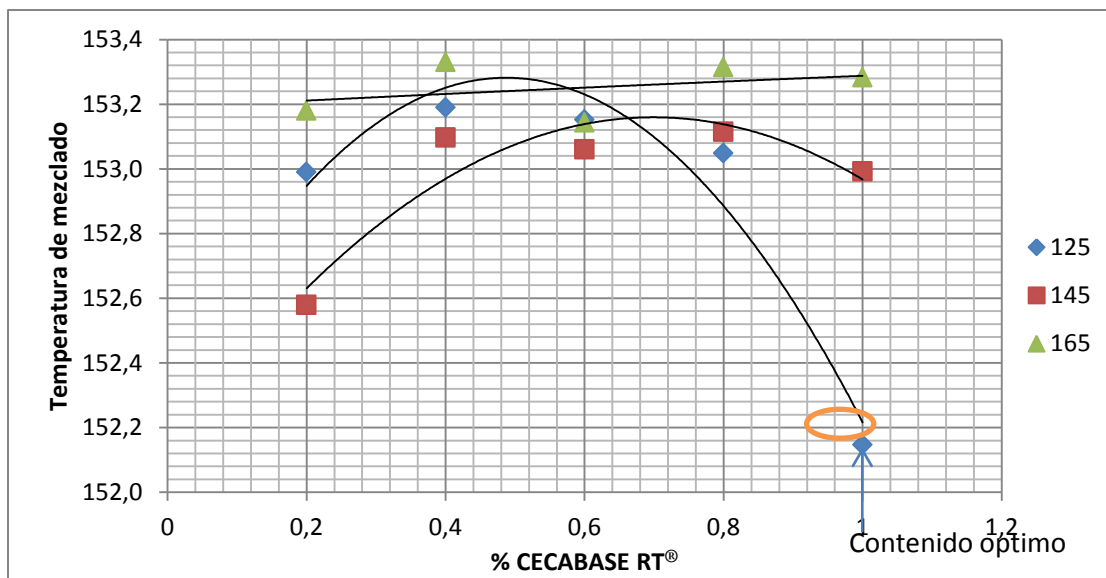


Figura 15 Curvas para la determinación del contenido óptimo de CECABASE RT®.

4.7.3 Contenido óptimo de REDISSET™ WMX

En la Tabla 11 se presentan los valores de temperatura de mezclado y en la Tabla 12 la temperatura de compactación; para cada porcentaje de aditivo REDISSET™ WMX determinados a partir del modelo de ángulo de fase de Casola (Ecuación 3). En la Figura 16 se presenta la reducción en las temperaturas de mezclado de cada muestra modificada.

Se determinó que el ligante asfáltico modificado RT-1.5%-165° C es en el que más reducción de temperatura presenta con respecto a las temperaturas del original, es evidente que la reducción de temperaturas de mezclado y compactación no sobrepasa una diferencia de 5 °C con respecto a los demás ligantes asfálticos modificados. De igual forma en las curvas maestras presentadas en el numeral 4.6 las curvas maestras del ángulo de fase(δ°) y las del módulo complejo no se presenta una variación significativa para cada ligante modificado, pero en las curvas maestras del ángulo de fase se presentó que a mayor porcentaje de aditivo REDISET™WMX el ángulo de fase decrecía y su comportamiento no sobrepasaba 70° por lo que los valores de la frecuencia angular no se pudieron determinar para el porcentaje más alto (2.5%).

Tabla 11. Temperatura de mezclado para cada porcentaje de aditivo REDISET™ WMX

% de aditivo	Temperatura de modificación (° C)		
	125	145	165
	Temperatura de mezclado		
0.5	125.00	145.00	165.00
1	152.90	152.63	152.76
1.5	152.98	153.29	153.09
2	155.40	154.09	153.12
2.5	152.95	155.73	153.68

Tabla 12. Temperatura de compactación para cada porcentaje de aditivo REDISET™ WMX

% de aditivo	Temperatura de modificación (° C)		
	125	145	165
	Temperatura de compactación		
0.5	139.13	139.13	139.13
1	139.13	139.12	139.12
1.5	139.10	139.11	139.12
2	139.13	139.09	139.12
2.5			

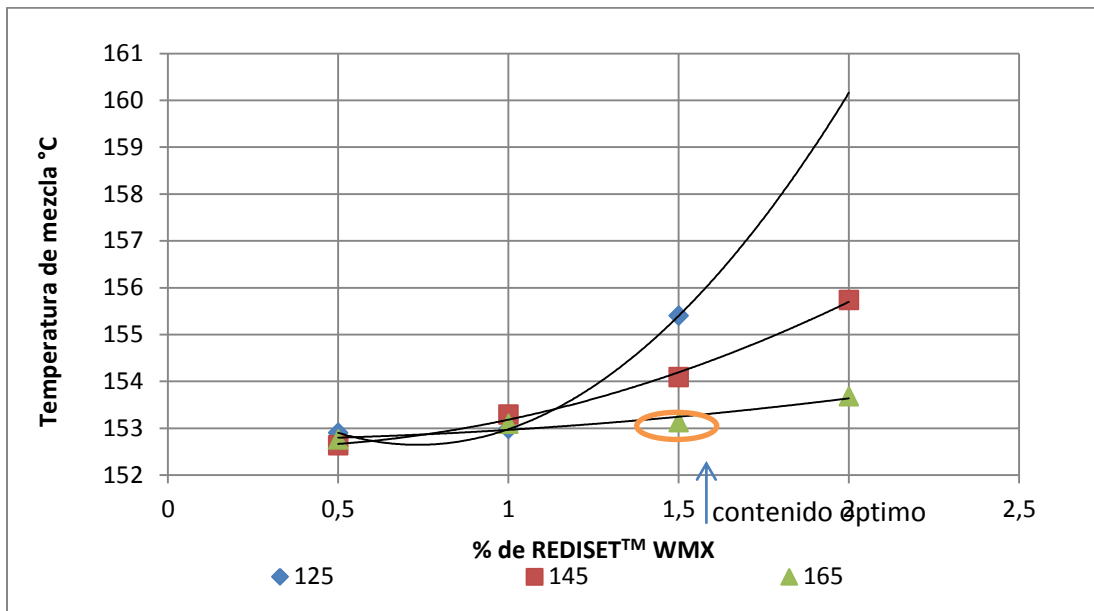


Figura 16. Relación del porcentaje de aditivo Rediset™ WMX con respecto a la temperatura de mezcla

4.8 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN ASFALTO BARRANCABERMEJA PENETRACIÓN 60-70 SIN MODIFICAR; ASFALTO MODIFICADO CON CECABASE RT® Y CON REDISSET™ WXM.

Se hizo una comparación del ligante asfáltico original con penetración 60-70 contra los ligantes modificados con el contenido óptimo los cuales fueron: RT-1.5%-165°C Y CB-1%-125°C para evaluar el comportamiento de sus propiedades físicas y reológicas y una respectiva verificación con las especificaciones para cemento asfáltico con penetración 60-70 del INVIAS 400-02 (ver Tabla 13) ((INVIAS 2007).

Tabla 13 Especificaciones del cemento asfáltico según INVIAS

Fuente:(INVIAS 2007).

CARACTERÍSTICA		Norma de ensayo INVIAS	60-70	
			mín	máx
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706-07	60	70
Índice de penetración	-	E-724-07	-1	+1
Viscosidad absoluta (60° C)	P	E-716-07	1500	
Ductilidad (25 °C, 5cm/min)	cm	E-702-07	100	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713-07	99	-
Contenido de agua	%	E-704-07	-	0.2
Punto de ignición mediante copa abierta deCleveland	°C	E-709-07	230	-
Pérdida por calentamiento en película delgada (163°C, 5 h)	%	E-721-07	-	1.0
Penetración del residuo luego de la perdida por calentamiento, en % de la penetración original	%	E-706-07	52	-

4.8.1 Ensayo de penetración

El ensayo de penetración se realizó para el ligante asfáltico de Barrancabermeja con penetración 60-70 para medir su consistencia a una temperatura de 25°C; de igual forma se procedió hacer este ensayo para cada muestra, realizando 3 pruebas determinando un promedio con el fin de verificar que la veracidad del ensayo. En la Tabla 14 se presentan los resultados del ensayo de penetración para los tres ligantes.

Tabla 14 Resultados ensayo penetración

Muestra	Valor promedio (1/10 mm)
Original	66.67
CB-1%-125° C	64.56
RT-1.5%-165° C	45.67

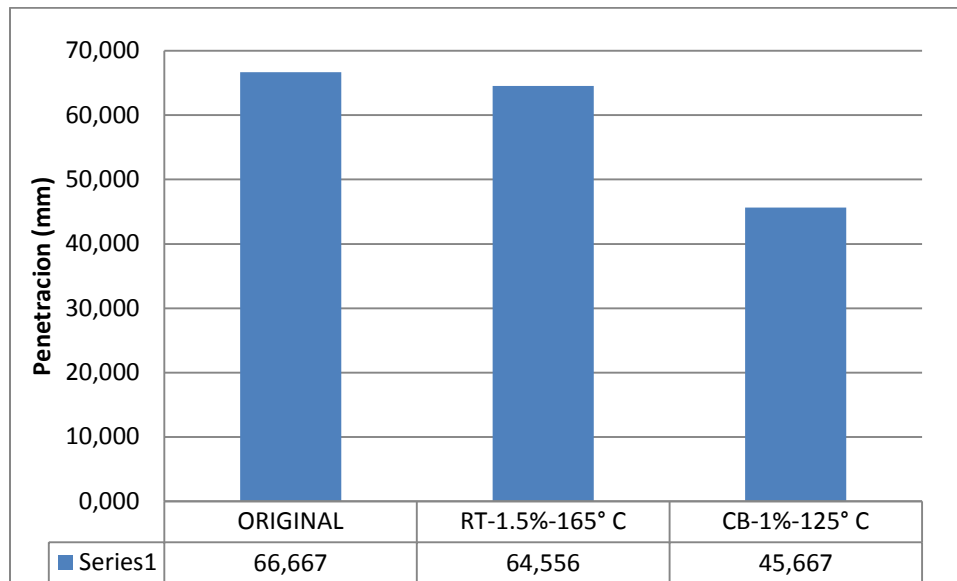


Figura 17 Comparación de ensayo de penetración

Se puede observar que el ligante asfáltico modificado con CECABASE RT[®] es el que presenta menor penetración, y el ligante asfáltico REDISSET[™] WMX presenta una penetración muy similar al del asfalto sin modificar, de igual forma los ligantes asfálticos evaluados se encuentran entre los parámetros establecidos en las especificaciones del cemento asfáltico de INVIAS 400.3 (verTabla 13)

4.8.2 Gravedad específica

En la Tabla 15 Datos de peso específico para ligante asfáltico 60-70 y para los contenidos óptimos se presentan los resultados del ensayo de penetración para los tres ligantes.

Tabla 15 Datos de peso específico para ligante asfáltico 60-70 y para los contenidos óptimos

Muestra	Valor promedio (g/cm ³)
Original	1.010
CB-1%-125° C	1.009
RT-1.5%-165° C	1.012

La gravedad específica para los tres asfáltico son muy parecidas, esta propiedad no es modificada por la adición de los aditivos.

4.8.3 Punto de ablandamiento

Este ensayo se realizó según las normas del INVIAS para ligantes asfálticos, con un asfalto con penetración 60-70 sin modificar para comparar los resultados con el comportamiento del ligante asfáltico de la misma procedencia pero modificado con los contenidos óptimos encontrados.

Tabla 16 Datos de punto de ablandamiento para ligante asfáltico 60-70 y para los contenidos óptimos

Muestra	Valor promedio (° C)
Original	51.3
CB-1%-125° C	51.1
RT-1.5%-165° C	50.1

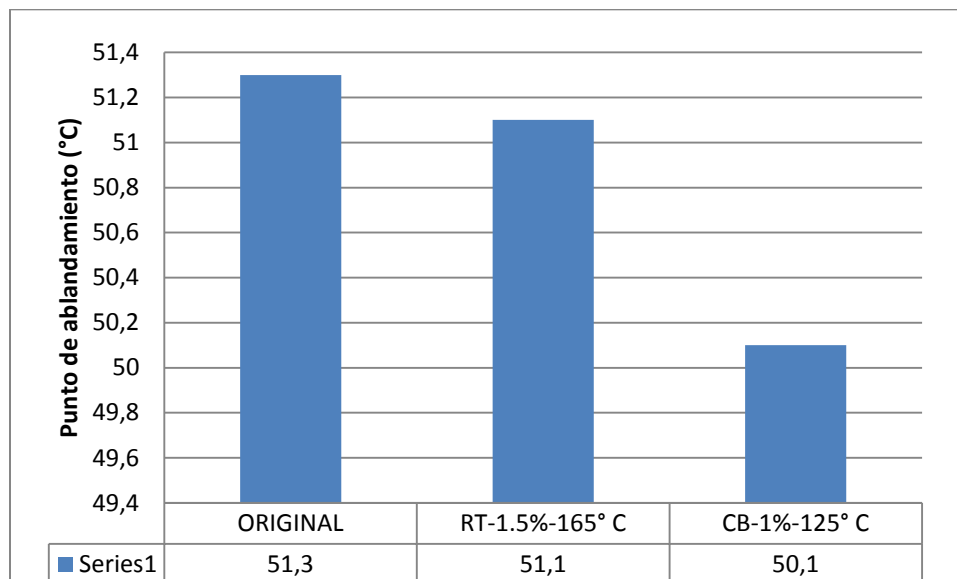


Figura 18 Comparación de Punto de ablandamiento contra tipo de ligante asfáltico

4.8.4 Índice de penetración (IP)

Se calcula el índice de penetración según las normas del INVIAS; con el resultado obtenido del punto de ablandamiento mostrado en el subíndice anterior (ver Tabla 14) y la siguiente ecuación:

$$IP = \frac{20 * t_{RaB} + 500 * \log P - 1952}{t_{RaB} - 50 * \log P + 120} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

t_{RaB} : Punto de ablandamiento en grados Celsius.

P : Penetración, en décimas de milímetro a 25° C.

Tabla 17 Datos índice de Penetración (IP)

Muestra	Valor promedio (-)
Original	-0.311
CB-1%-125° C	-1.380
RT-1.5%-165° C	-0.175

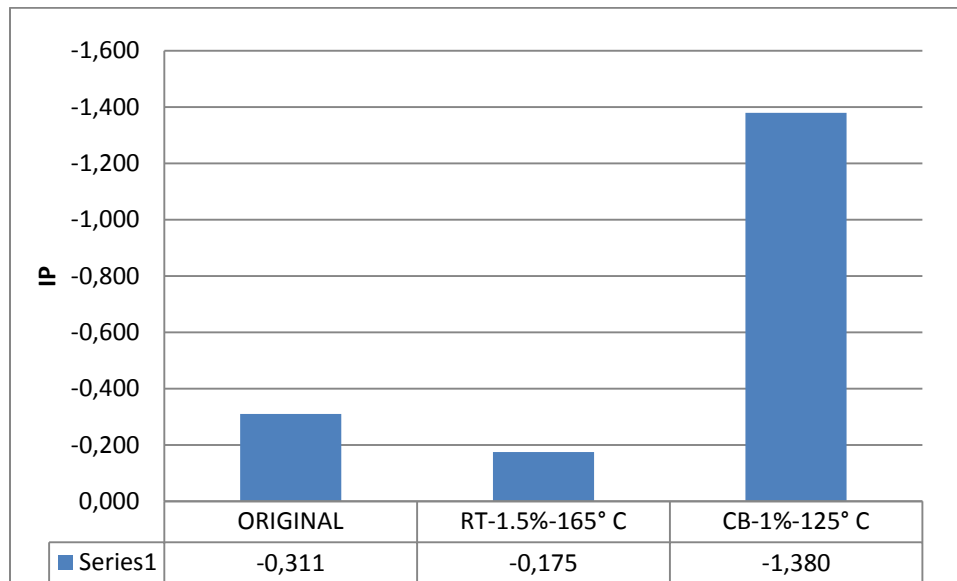


Figura 19 Comparación de índice de penetración contra tipo de ligante asfáltico

4.8.5 Viscosidad rotacional

El ensayo del viscosímetro rotacional se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye la gráfica para comparar los resultados del asfalto original 60-70 con los ligantes asfálticos modificados con REDISET™ WMX y CECABASE RT®(ver Figura 20) en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades 170 cP y 280 cP respectivamente.

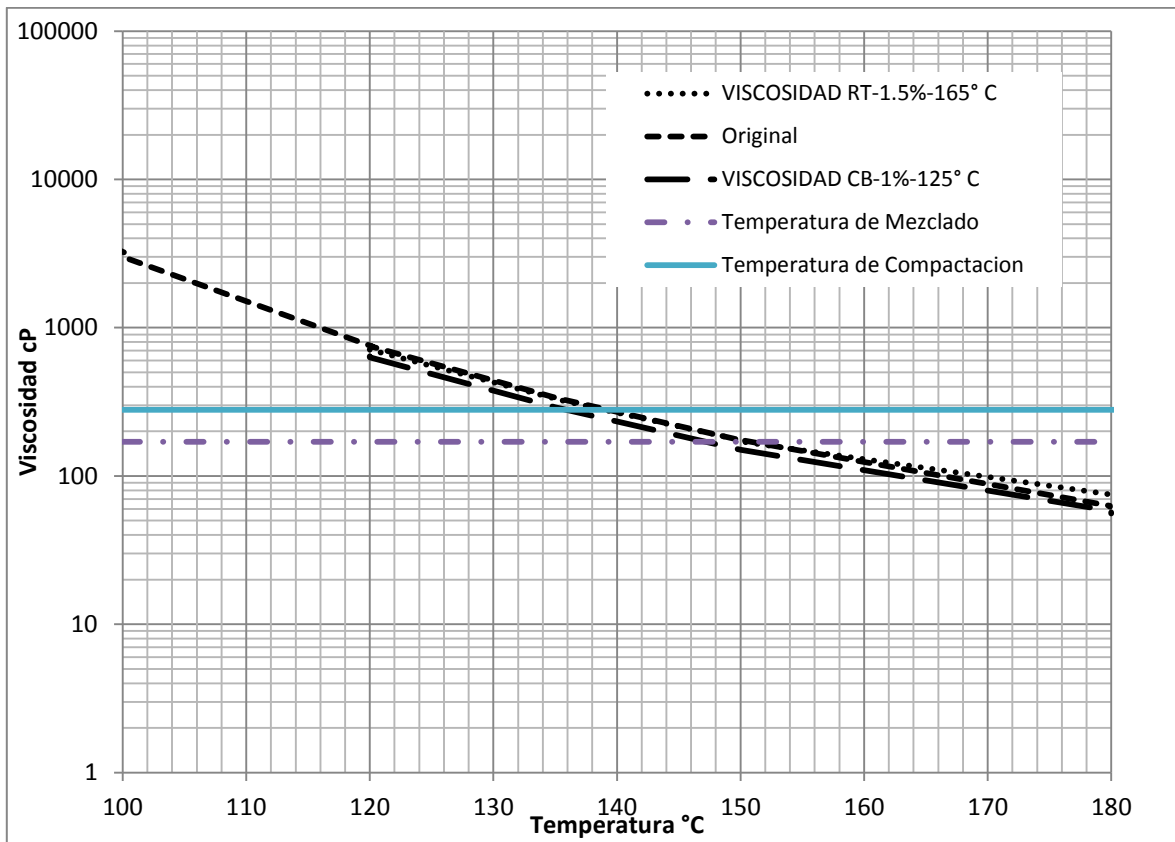


Figura 20 Viscosidad rotacional para ligante asfáltico original y modificados

Se realizó una viscosidad rotacional para cada ligante asfáltico modificado con el contenido óptimo de cada aditivo, REDISSET™ WMX y CECABASE RT®; de lo cual se pueden evidenciar que la viscosidad rotacional de los tres (3) asfaltos tienen un comportamiento que no son muy concluyentes ya que la variación de las temperaturas no pasa de una diferencia de 2° C (ver Figura 20).

5 DISCUSION

El porcentaje optimo del aditivo CECABASE RT[®] obtenido por Gonzales y colaboradores (2009) fue de 0.2 a 0.5 por ciento respecto al peso del ligante; sin embargo, en esta investigación el porcentaje óptimo de este aditivo fue de 1.0 %, un valor que es casi el doble a lo presentado por estos investigadores esto puede presentar mayores costos en la fabricación de las mezclas asfálticas pues es el doble en porcentajes y en costos.

Al igual que el trabajo reportado por Gonzales y colaboradores (2009) en mezclas asfálticas tibias utilizando CECABASE RT[®], y Casanova y Rodriguez (2012) en esta investigación se encontró que este aditivo no modifica significativamente las propiedades reológicas del ligante, como lo es la curva de viscosidad-temperatura para comparar los tres ligantes asfálticos, el de referencia y los dos modificados con los contenidos óptimos .

Al igual que los resultados obtenidos por Rodríguez y casanova (2012), en esta investigación no se encontró un cambio considerable en las propiedades reológicas del ligante modificado con CECABASE RT[®], comparado con el ligante asfáltico sin modificar. A diferencia de lo concluidos en la tesis de Rodríguez y casanova (2012), con la metodología utilizada en esta investigación sí se logró inferir un porcentaje óptimo de este aditivo.

Investigaciones desarrolladas en América y Europa con el aditivo REDISET[™]WMX han reportado mejoría en las propiedades reológicas de los ligantes modificados con este aditivo, lo que es concordante con lo encontrado en esta investigación.

De acuerdo con los resultados reportados por Akzo Nobel Surface Chemistry LLC(2009), fabricante del aditivo REDISSETTMWMX, en esta investigación tampoco se encontraron resultados relevantes de viscosidad medida con el equipo Brookfield que mostraran un cambio significativo en esta propiedad del ligante modificado con este aditivo. Siendo coherente con lo reportado por esta empresa, donde afirman que las temperaturas de mezclado y compactación se determinan en campo a partir de tramos de prueba.

6 CONCLUSIONES

- Los contenidos de aditivo óptimos para la mezcla asfáltica determinados a partir del análisis reológico en función de los ensayos en el DSR fueron: para el aditivo REDISET™ WMX 1.5% modificado a una temperatura de 165° C, y para el aditivo CECABASE RT® 1% modificado a una temperatura de 125° C, siendo estos resultados concordantes con los datos teóricos reportados previamente en la literatura.
- No se logró la validación del ensayo “viscosidad a cero corte” (ZSV) para la determinación de los porcentajes óptimos de modificación del ligante. Lo anterior debido a que esta metodología maneja altas temperaturas que pueden afectar las propiedades del asfalto. Por lo anterior, se decidió implementarla metodología reológica de Casola en el año 2010 haciendo uso de los resultados del ensayo en DSR. De igual forma, el nivel de investigación que se tiene como referencia de este tipo de pruebas con el ensayo ZSV es muy escasa.
- Al realizar la comparación de las propiedades mediante ensayos de laboratorio del ligante de Barrancabermeja con penetración 60-70 sin modificar (de referencia), y del ligante modificado con los dos aditivos, se determinó que las propiedades de los asfaltos modificados no presentan ninguna variación por la modificación. Por lo anterior, no es posible determinar las temperaturas de mezclado y compactación con ensayos de caracterización convencionales.

•

- No es aplicable utilizar las constantes de los parámetros presentados por Casola, en la metodología de ángulo de fase desarrollada por el mismo autor, para los asfaltos colombianos para la determinación de temperaturas de mezclado y compactación pues no se encontró los resultados esperados. Lo anterior debido a que estas constantes fueron obtenidas a partir de calibraciones realizadas sobre distintos asfaltos.
- Según la literatura investigada, y los datos obtenidos del fabricante de los aditivos CECABASE RT[®] y REDISSET[™] WMX, se afirma que estos dos productos si son capaces de disminuir las temperaturas de mezclado y compactación, y también ofrecen una gran solución respecto a la mitigación de la contaminación ambiental que generan la emisión de gases comparado con la fabricación de una mezcla asfáltica en caliente.

7 RECOMENDACIONES

- Es de gran importancia continuar investigando en la implementación de nuevas tecnologías para mezclas asfálticas tibias. Estas investigaciones se deben complementar con la experiencia de tramos de prueba en campo, con el fin de realizar especificaciones locales y normas de ensayo acordes a este tipo de mezclas asfálticas.
- Se recomienda continuar investigando metodologías que permitan determinar en laboratorio, de forma confiable, las temperaturas de mezclado y compactación de mezclas asfálticas tibias.
- Al momento de modificar los asfaltos se debe tener muy presente la temperatura permanente de mezclado, debido a que una temperatura mayor a 180° C puede ocasionar que el asfalto pierda sus propiedades por procesos de oxidación.
- Para desarrollar la metodología del ángulo de fase determinado por Casola, se recomienda calibrar los valores de los parámetros de las ecuaciones con relación a la curva de viscosidad que presenta el asfalto estudiado, para obtener las temperaturas de mezclado y compactación; e Implementar un sistema que facilite el cálculo de las curvas maestras, de tal manera que se pueda realizar este proceso con mayor confiabilidad.

- Para cada tipo de ligante asfáltico a emplear, se recomienda realizar un estudio completo donde se varíen los porcentajes de aditivo y temperaturas de modificación, para determinar el porcentaje óptimo del aditivo a emplear, complementado con otros ensayos de caracterización diferentes a los propuestos en este trabajo de investigación que permitan establecer el este contenido.

8 BIBLIOGRAFÍA

Aguiar Moya, J. P., T. Q. R. E. Villegas Villegas, et al. (2012). Calibracion de modelos basados en curvas maestras para temperaturas de mezclado y compactacion en costa rica. VIII Jornada internacional del asfalto. Bogotá, Corasfalto.

Akzo Nobel Surface Chemistry AB (2008). REDISET™ WMX-8017 Multifunctional additive for Hot Mix.

Akzo Nobel Surface Chemistry LLC (2009). Surface-active bitumen additive for warm mix asphalt with adhesion promoting properties.

AkzoNobel Surface Chemistry (2011). "Rediset® WMX ".

Anderson, D. A., D. W. Christensen, et al. (1991). "Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications."

Asphalt Institute (2006). Laboratory Mixing and Compaction Temperature. Asphalt Institute Technical Bulletin. Lexington, Kentucky USA.

Bahia, H. U. and D. A. Anderson (1995). "He new proposed rheological properties of asphalt binders: why are they required and how do they compare to conventional properties."

Bahia, H. U., D. A. Anderson, et al. (1992). "The bending beam rheometer; a simple device for measuring low-temperature rheology of asphalt binders."

Biro, S., T. Gandhi, et al. (2009). "Midrange Temperature Rheological Properties of Warm Asphalt Binders." Materials in Civil Engineering 21, No. 7, 316-323.

Blades, C. (2009). "Hot, Warm, Luke Warm and Cold Mix Asphalt."

Calderon, A. u. (2011). "Mezclas Asfálticas Tibias (MAT)." vol. 2 (no. 15).

Casanova T., S. L. and P. K. Rodriguez C. (2012). Caracterización física de ligantes asfálticos con CECABASE para mezclas tibias. Facultad de ingeniería. Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana.

CECA ARKEMA GROUP (2008). "W A R M M I X A S P H A L T Cecabase RT."

Cuadro C., C. A. and J. I. Osorio E. (2012). Construcción de las curvas maestras del Mástic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y de muestras recuperadas de mezclas en servicio. Facultad de ingeniería, Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá, Pontificia Universidad Javeriana.

Cuberos, X. (2006). "Historia del Asfalto." from <http://proyectos.blogdiario.com/1140707220/historia-del-asfalto/>.

D'Angelo, J., E. Harm, et al. (2008). Warm-Mix Asphalt: European Practice American Trade Initiatives: 68.

D'Angelo, J., E. Harm, et al. (2008). "Warm- Mix Asphalt: European Practice."

Estakhri, C. K., Rongji Cao, et al. (2009). "Production, Placement, and Performance Evaluation of Warm Mix Asphalt in Texas."

European Asphalt Pavement Association EAPA (2010). "The Use of Warm Mix Asphalt." 1-13.

Gandhi, T. (2008). Effects of warm asphalt additives on asphalt binder and mixture properties, Clemson University.

Gobierno Nacional Republica de Panamá. (2002). "Mezcla Asfáltica Densa en Frío", from <http://www.mop.gob.pa/especificaciones/edicion%202002/>

González-León, J., P. Caujolle, et al. (2011). "Chemical Additives for Warm Mix Asphalts."

Gonzalez, J., S. Lingier, et al. (2009). Warm Mix Asphalts with Chemical Additives: Properties and Advantages. II international conference. Environmentally friendly roads. Enviroad.

González L., J. A., L. Grampre, et al. (2009). "Warm-Mix Asphalts with Low-Dosage Chemical Additives."

GROUP, V.-C., H. A León, et al. (2005). "Tecnología del Cemento Asfáltico. ." 108-200 p. ISBN 958-06666-0-4.

Hajj, E. Y. P. D. and E. M. Cortez (2010). "EVALUATION OF THE CECABASE™ RT WARM-MIX ADDITIVE." no. p. 4-6.

Hearon, A. and S. Diefenderfer (2008). "Laboratory Evaluation of warm Asphalt Properties and performance " Airfield and Highway Pavements 2008(ASCE): 182-194.

Hearon, A. J. and S. D. Diefenderfer (2009). Laboratory evaluation of warm asphalt properties and performance. The 2008 Airfield and Highway Pavements Conference, American Society of Civil Engineers ASCE.

Hurley, G. and B. Prowell (2006). "Evaluation of Potential Process for use in Warm Mix Asphalt." Assoc. Asph. Paving Technol 75, 41–90.

INVIAS. (2007). "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."

Lagos S., G. and C. Vélez C. (2010). "PROTOCOLO DE KIOTO."

Ministerio de obras públicas de Panamá. (2002). "Mezcla asfáltica densa en frío ", from <http://www.mop.gob.pa/especificaciones/edicion%202002/>

Montejo, A. (2006). Ingeniería De Pavimentos., UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA.

Perkins, S. (2009). "Synthesis od warm mix asphalt paving strategies for use in Montana higway construction."

Ran, J., S. Xu, et al. (2010). "Research on the performances of warm Asfhalt and Warm Mix Asphalt with Sasobit." Green Intelligent Reliable 2010(ICCTP 2010: Integrated transportation systems).

Robjent, L. and W. Dosh (2009). "Warm-Mix Asphalt for Rural County Roads." Cold Regions Engineering 2009: 438-454.

Rubio, M. C., G. Martínez, et al. (2012). "Warm mix asphalt: an overview." Journal of cleaner production 24: 76-84.

Silva, H. M. R. D., J. R. M. Oliveira, et al. (2010.). "Optimization of Warm Mix Asphalts Using Different Blends of Binders and Synthetic Paraffin Wax Contents." Construction and Building Materials 24 (9): 1621-1631.

Speier, G. (1994). "Antecedentes del diseño de mezclas Asfalticas de Superpave." p. 1-170.

Tao, Z., F. Ni, et al. (2009). "Evotherm Warm Mix Asphalt Technology Applied on Ultra-thin Pavement in China." GeoHunan International Conference 2009: 171-176.

Vaitkus, A., D. Čygas, et al. (2009). "Analysis and Evaluation of Possibilities for the use of Warm Mix Asphalt in Lithuania." The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering 4(2): 80–86.

You, Z. and S. Goh (2008). "Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt: A Preliminary Study." En Pavement Res. Technol.: 34-40.

**ANEXO A—CURVAS ORIGINALES DEL ÁNGULO DE FASE CONTRA LA
FRECUENCIA ANGULAR**

**ANEXO B –CURVAS ORIGINALES DEL MÓDULO COMPLEJO DE CORTE
CONTRA LA FRECUENCIA ANGULAR**

**ANEXO C-CURVAS MAESTRAS DE ANGULO DE FASE
CONTRAFRECUENCIA ANGULAR PARA EL LIGANTE ORIGINAL Y PARA
LOS LIGANTES MODIFICADOS CON REDISET™ WMX Y CECABASE RT®**

**ANEXO D—CURVAS MAESTRAS DE MODULO COMPLEJO CONTRA
FRECUENCIA ANGULAR PARA EL LIGANTE ORIGINAL Y PARA LOS
LIGANTES MODIFICADOS CON REDISSET™ WMX Y CECABASE RT®**

**ANEXO E –ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS LIGANTES
ASFÁLTICOS MODIFICADOS CON LOS CONTENIDOS ÓPTIMOS.**
