

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS CON CECABASE
PARA MEZCLAS TIBIAS**

**SANDRA LORENA CASANOVA T.
PAOLA KATHERINE RODRIGUEZ C.**



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
2012**



**CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS CON CECABASE
PARA MEZCLAS TIBIAS**

**SANDRA LORENA CASANOVA T.
PAOLA KATHERINE RODRIGUEZ C.**

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
2012**



APROBACIÓN

El Trabajo de Grado titulado “CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS CON CECABASE PARA MEZCLAS TIBIAS”, desarrollado por las estudiantes SANDRA LORENA CASANOVA T. y PAOLA KATHERINE RODRIGUEZ C, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el título de Ingeniero civil, fue aprobado por:

Director de Tesis
Manuel Santiago Ocampo Terreros

Jurado



Dedicamos este Trabajo de grado a nuestras familias, gracias por sus consejos y palabras de aliento con los cuales pudimos crecer como personas y profesionales, además de brindarnos su apoyo y fortaleza que nos ayudaron a culminar satisfactoriamente nuestra investigación.



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de Trabajo de grado el Ingeniero Manuel Ocampo, por su orientación, paciencia y dedicación en el desarrollo de esta investigación, por la confianza y el apoyo depositado en nosotras. Al Ingeniero Jorge Sánchez y Henry Torres de Shell Colombia, por sus aportes en el desarrollo de este proyecto, al suministrarnos el material necesario para el proceso y obtención de los resultados. Al Ingeniero Wilmar Fernández y al Ingeniero Jonathan Vera por su apoyo en el proceso de nuestra investigación, por el aporte de sus conocimientos en la realización de los ensayos, por su ayuda constante en el proyecto.

A Dios, a mis padres y hermanos, por creer siempre en mí, por el apoyo incondicional en todas las decisiones tomadas en mi vida, por haber fomentado en mi el anhelo de triunfo y a mi novio por su amor, paciencia, comprensión y motivación. *(Sandra Lorena Casanova T.)*

A mi familia, por su apoyo constante en mi proceso profesional, por que gracias a ustedes hoy puedo ver alcanzada mi meta ya que siempre estuvieron impulsándome en los momentos mas difíciles de mi carrera, porque el orgullo que sienten por mi fue lo que me impulso a llegar al final y a mi novio por su comprensión y apoyo. *(Paola Rodríguez).*

A nuestros profesores, por su asesoría y conocimientos, al personal de laboratorio por su colaboración desinteresada, y a nuestros compañeros, con quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional.

RESUMEN

Reducir el consumo de energía así como las emisiones en la industria de la producción de mezclas asfálticas requiere la reducción de temperaturas de fabricación, las cuales tienden a perjudicar el rendimiento de la misma, por tal motivo el objetivo de esta investigación es 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 que tengan el mismo desempeño que una mezcla asfáltica caliente y que brinden soluciones a la problemática ambiental nacional, consiguiendo reducciones en la temperatura de producción y aplicación de la mezcla hasta de 40° C, proporcionando así un ahorro significativo en la energía de producción, logrando importantes avances en la protección del medio ambiente, mejorando las condiciones laborales del trabajador y manteniendo siempre el desempeño de la mezcla. El presente trabajo inicio con el objetivo de evaluar el ligante modificado con el aditivo ya mencionado, al observar que no se presentaron cambios en sus propiedades físicas, se decidió introducir en el tema de mezclas, con el fin de verificar la reducción de temperaturas de compactación y mezclado, utilizamos una mezcla asfáltica tipo MDC-2 de INVIAS, modificada con 0.4% de CECABASE RT[®], esta mezcla fue compactada en el compactador giratorio SUPERPAVE y se caracterizó por medio del ensayo de susceptibilidad a la humedad, el resultado del ensayo de tracción indirecta, mostraron que la mezcla asfáltica tibia tiene el mismo desempeño de una mezcla asfáltica caliente, concluyendo que no se encuentra variación en las características físicas del ligante con la adición del aditivo, sin embargo se logra la reducción de la temperatura de los agregados en la producción de la mezcla.

Palabras Clave: Mezclas asfálticas tibias, Aditivo químico CECABASE RT[®], caracterización del ligante, Ensayo de Tracción Indirecta TSR.

ABSTRACT

Reduce energy consumption and emissions in the production of asphalt mixtures require the reduction of production temperatures, which tend to affect the performance of it. For this reason, the objective of this research is to present the laboratory results obtained from the physical characterization of asphalt binders with different percentages of additive CECABASE RT[®] to produce warm mix asphalt with the same performance that a hot mix asphalt, providing solutions to national environmental issues, achieving reductions in the production and compaction temperatures up to 40 ° C, thus providing significant savings in energy production, making progress in the protection of the environment, improving the working conditions of workers and maintaining the performance of the mixture. This work began with the aim of evaluating the modified binder with this chemical additive. However, no changes were observed in physical properties, so it was decided to introduce the mixtures subject, in order to verify the reduction of mixing and compaction temperatures, a MDC-2 asphalt mixture (a kind of dense graded asphalt used in Colombia), was modified with 0.4% of CECABASE RT[®], the mixture was compacted in the Superpave gyratory compactor and characterized by the moisture sensitivity test, the indirect tensile strength results, showed that the warm mix asphalt had the same performance than a hot mix asphalt, concluding that there is no variation in the physical characteristics of the binder with the addition of the additive. Nevertheless, achieves the reduction of temperature of the aggregates in the production of the mixture.

Keywords: warm mix asphalt, chemical additive CECABASE RT[®], binder characterization, Indirect tensile strength and tensile strength ratio (TSR).

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos.....	3
2 MARCO CONCEPTUAL	5
2.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	5
2.2 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS MATERIALES.....	8
2.2.1 Ligante Asfáltico	8
2.2.2 Agregados Pétreos.....	9
2.2.3 Tipo de Aditivo CECABASE RT®	10
2.3 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	11
2.3.1 Ensayo de Ductilidad.....	12
2.3.2 Ensayo de Penetración	13
2.3.3 Gravedad específica.....	14
2.3.4 Punto de ignición y llama.....	14
2.3.5 Punto de ablandamiento.....	15
2.3.6 Estabilidad al Almacenamiento	16
2.3.7 Viscosidad Rotacional	17
2.3.8 DSR.....	19
2.3.9 Mezcla Asfáltica.....	20
2.3.10 Diseño de Mezcla Asfáltica SUPERPAVE.....	21
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	39
3.1 Materiales	39

3.1.1	Tipo de Ligante Asfáltico	39
3.1.2	Tipo de Agregados	40
3.2	Métodos	41
3.2.1	Compactador Giratorio	41
3.2.2	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta TSR	43
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
4.1	RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE EL LIGANTE ASFÁLTICO CON PENETRACIÓN 60/70	45
4.1.1	Ensayo de Ductilidad.....	46
4.1.2	Ensayo de Penetración	46
4.1.3	Gravedad específica.....	48
4.1.4	Punto de ignición y llama.....	48
4.1.5	Punto de ablandamiento.....	48
4.1.6	Índice de Penetración.....	50
4.1.7	Viscosidad Rotacional	51
4.1.8	DSR.....	52
4.2	RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE EL LIGANTE ASFÁLTICO PENETRACIÓN 80/100	53
4.2.1	Ensayo de Ductilidad.....	54
4.2.2	Ensayo de Penetración	54
4.2.3	Gravedad específica.....	56
4.2.4	Punto de ignición y llama.....	56
4.2.5	Punto de ablandamiento.....	56
4.2.6	Índice de Penetración.....	58
4.2.7	Viscosidad Rotacional	58
4.2.8	Estabilidad al Almacenamiento	60
4.2.9	DSR.....	62
4.3	RESULTADOS DEL ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL CON MAYORES PORCENTAJES DE ADITIVO.....	63

4.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS SOBRE LA CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE MODIFICADO.....	66
4.5	RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA	67
4.5.1	Selección de Materiales	67
4.5.2	Compactación Giratorio Superpave.....	73
4.5.3	Prueba de Tracción Indirecta TSR	74
5	<i>DISCUSIÓN</i>.....	80
6	<i>CONCLUSIONES</i>.....	82
7	<i>RECOMENDACIONES</i>	84
8	<i>BIBLIOGRAFÍA</i>.....	86



LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A.** Resultados de caracterización ligante asfáltico de penetración 60/70
- ANEXO B.** Resultados de caracterización ligante asfáltico de penetración 80/100
- ANEXO C.** Diseño de Mezcla
- ANEXO D.** Resultados de Mezcla asfáltica en caliente MDC-2
- ANEXO E** Resultados de Mezcla asfáltica tibia modificada con CECABASE RT[®]
- ANEXO F.** Resultados de Mezcla asfáltica tibia sin modificar.
- ANEXO G.** Ficha Técnica de Aditivo CECABASE RT[®] y Hoja de seguridad de Aditivo CECABASE RT[®].
- ANEXO H.** Foto Documentación.



LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Comportamiento del Cemento asfáltico, bajo características de Temperatura y Tiempo.....	8
Figura 2 Comportamiento Visco-Elástico del Cemento Asfáltico.....	9
Figura 3. Equipo de Ductilidad	12
Figura 4. Penetrómetro	13
Figura 5. Equipo de punto de Ignición y llama.....	15
Figura 6. Equipo de punto de ablandamiento.....	16
Figura 7. Estabilidad al almacenamiento de ligante con CECABASE RT®	17
Figura 8. Viscosímetro Rotacional.....	18
Figura 9. Reómetro de corte directo.....	19
Figura 10 Ejemplo de cómo se Grafican las abscisas.....	25
Figura 11 Graduación de máxima densidad para tamaño de 19mm.....	26
Figura 12 Limites de Granulometrías Superpave.....	27
Figura 13 Gravedad específica del agregado mineral.....	32
Figura 14 Parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica	32
Figura 15. Ligante asfáltico suministrado por Shell Colombia	39
Figura 16. Agregado Petreo	40
Figura 17. Ensayo de Penetración en Ligante Asfáltico de Penetración 60/70	47
Figura 18. Promedio y Desviación Estándar de Ensayo de Penetración 60/70	47
Figura 19. Punto de Ablandamiento Ligante de Penetración 60/70	49
Figura 20. Punto de Ablandamiento de promedio de muestras Ligante de Penetración 60/70	49
Figura 21. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 60/70	51
Figura 22. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 60/70 con Temperatura constante cambiando el porcentaje de Aditivo CECABASE RT®	52

Figura 23. Ensayo DSR con reómetro de corte directo ligante 60/70 sin modificar y con aditivo CECABASE RT [®] al 0.4%	53
Figura 24. Ensayo de Penetración en Ligante Asfáltico de Penetración 80/100 ...	55
Figura 25. Promedio y Desviación Estándar de Ensayo de Penetración 80/100 ..	56
Figura 26. Punto de Ablandamiento Ligante de Penetración 80/100	57
Figura 27. Punto de Ablandamiento de promedio de muestras Ligante de Penetración 80/100	57
Figura 28. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 80/100 realizados en Shell y PUJ.....	59
Figura 29. Viscosidad rotacional de ligantes modificados penetración 80/100 con Temperatura constante cambiando el porcentaje de Aditivo CECABASE RT [®]	60
Figura 30. Ensayo DSR con Reómetro de Corte Directo ligante 80/100 sin modificar y con aditivo CECABASE RT [®] al 0.4%	62
Figura 31 Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 80/100 realizados con mayores porcentajes de aditivo (1% al 5%)	64
Figura 32 Viscosidad Rotacional a temperatura constante de 135° C de Ligantes con penetración 80/100 con mayor porcentaje de Aditivo CECABASE RT [®]	64
Figura 33 Granulometría de la mezcla Asfáltica.....	69
Figura 34 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica caliente HMA	75
Figura 35 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica tibia sin aditivo WMA*....	76
Figura 36 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica tibia con aditivo WMA....	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayos de Caracterización del ligante.....	11
Tabla 2 Niveles de análisis de Método Superpave.....	22
Tabla 3 Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente	23
Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico	24
Tabla 5 Graduaciones para mezcla Superpave.	27
Tabla 6 Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm	28
Tabla 7 Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm	28
Tabla 8 Número de giros de compactación para el diseño Superpave	29
Tabla 9 Criterio para VMA.....	30
Tabla 10 Criterio para VFA.....	30
Tabla 11. Valores para el compactador giratorio SHRP.....	43
Tabla 12. Resultados de ensayos de ductilidad 60/70	46
Tabla 13. Índice de Penetración de Ligante 60/70	50
Tabla 14. Resultados de ensayos de ductilidad 80/100	54
Tabla 15. Índice de Penetración de Ligante 80/100	58
Tabla 16 Diferencia en el ensayo punto de ablandamiento.....	61
Tabla 17 Diferencia en el ensayo de penetración	61
Tabla 18 Temperatura de Mezcla y Compactación con mayores porcentajes de Aditivo	65
Tabla 19 Viabilidad económica según el porcentaje de CECABASE RT [®] en 1 Tonelada de Ligante asfáltico.....	66
Tabla 20 Ensayos del agregado pétreo.....	68
Tabla 21 Propiedades de los agregados pétreos	69
Tabla 22 Porcentaje inicial de ligante asfáltico.....	70

Tabla 23 Propiedades Volumétricas y de Compactación	71
Tabla 24 Resumen propiedades volumétricas y de compactación con 5.7% de ligante.....	71
Tabla 25 Resumen propiedades volumétricas y de compactación.....	72
Tabla 26 Número de Probetas realizadas	73
Tabla 27 Temperaturas para la realización de briquetas	74
Tabla 28 Alturas de las briquetas para obtener $7\pm 1\%$ de vacíos	74
Tabla 29 Resumen de resultados de ensayos para los tres tipos de mezclas	78

INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas tibias (WMA por sus siglas en inglés de *Warm Mix Asphalt*) son un concreto asfáltico mezclado y compactado a temperaturas más bajas que las temperaturas usadas en mezclas asfálticas en caliente (HMA por sus siglas en inglés de *Hot Mix Asphalt*). Durante los últimos 10 años, las agencias de transporte y la industria de construcción de pavimentos han unido esfuerzos para desarrollar nuevas tecnologías con las cuales se puedan disminuir las temperaturas de fabricación y colocación de las mezclas asfálticas, y con esto los costos derivados por la utilización de recursos energéticos no renovables, sin sacrificar el desempeño de la mezcla asfáltica resultante. En cuanto al componente ambiental, se han logrado grandes beneficios como la reducción en la emisión de gases y en el consumo de combustibles; en cuanto a lo relacionado con Salud Ocupacional, se reduce la exposición a humos, gases, y radiación de calor a los que está sujeto el trabajador en el proceso de colocación de la mezcla; y en cuanto al desempeño de las mezclas asfálticas, se ha encontrado una reducción del envejecimiento del ligante durante la producción de la mezcla, al igual que un aumento de su durabilidad e incremento de la distancia de transporte, tiempo que es útil para mantener la trabajabilidad en las labores de colocación y compactación de la mezcla(D'Angelo J. *et al.*, 2008).

El presente trabajo de grado describe el uso particular de aditivo químico CECABASE RT[®], producido por el grupo CECA de Arkema, líder europeo en emulsiones y agentes de adhesión para el asfalto. El desarrollo de este tipo de aditivo para producir mezclas asfálticas tibias, nació en el Centro de Investigación Arkema Rhône-Alpes en el 2003. Como resultado de esta investigación, desde el año 2006 se ha venido comercializando este producto, logrando que más de 2.5 millones de toneladas de mezclas de asfalto fueran producidas alrededor del mundo con CECABASE RT[®] (CECA w., 2011).

Esta tecnología, la cual ha sido probada en distintas condiciones tanto en su uso en campo como en laboratorio, mejora la trabajabilidad de la mezcla de asfalto, permitiendo que se presente una reducción en la temperatura de mezclado y compactación hasta de 40° C, reduciendo el consumo de energía de 20% a 35%, dando como resultado un ahorro anual de 700,000 toneladas de combustible, y evitando la emisión de 1.8 millones de toneladas de Dióxido de Carbono a la atmósfera. Con esta tecnología se requiere solamente del 0.3% al 0.5% del aditivo respecto al peso del ligante, y mostrando una notable ventaja económica, pues este aditivo no demanda cambios en la planta de producción, siendo su uso tan simple como adicionarlo al ligante (GROUP V.-C.A., 2008).

En el presente trabajo se muestran distintos ensayos que se realizaron tanto a los ligantes como a las mezcla asfálticas utilizando el aditivo CECABASE RT[®], suministrado por Shell Colombia, con el fin de verificar la reducción de temperaturas de compactación y mezclado, mostrando las distintas ventajas que este tipo particular de aditivo puede proporcionar. Los objetivos que se plantearon para este trabajo son los que se presentan a continuación:

1.1 Objetivo General

Evaluar las propiedades físicas de dos cementos asfálticos con penetraciones 60/70 y 80/100 de Barrancabermeja modificado con CECABASE RT[®] para reducir la temperatura de mezclado y compactación de una mezcla asfáltica

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar los ligantes asfálticos sin modificar.
- Caracterizar los ligantes asfálticos modificado con CECABASE RT[®].
- Determinar el contenido óptimo de aditivo CECABASE RT[®].



2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

La búsqueda de la implementación de las mezclas asfálticas tibias se remonta al año 1997 en Europa, año en el que se adoptó el protocolo de Kioto por la Comunidad Económica Europea, con el fin de lograr una conciencia ambiental sobre una estricta reducción de las emisiones atmosféricas (Calderón A.U., 2011).

Por consiguiente, se han elaborado productos que son capaces de mejorar la elaboración de mezclas asfálticas con mejores propiedades reológica, físicas y mecánicas, sin impactar al medio ambiente por emisión de gases contaminantes y el consumo elevado de combustible (Montejo 2006). En este sentido, 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 mismas, 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 et al. 2009).

Como un aporte importante de las mezclas asfálticas tibias, los impactos sobre los ingresos de exportación por las medidas de mitigación adoptadas por los países desarrollados, basados fundamentalmente en la reducción del consumo de combustibles fósiles de acuerdo con el protocolo de Kioto, resulta ser una gran oportunidad para proponer estrategias que permitan disminuir el consumo desmesurado de los recursos naturales y ayudar a mitigar los impactos ambientales ocasionados por la utilización de hidrocarburos en la construcción de pavimentos asfálticos.

Por esta razón, 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 cuatro grupos: aditivos a base agua o a base de agua con proceso de espuma, aditivos orgánicos, tecnologías de secuencia de bitúmenes duros y blandos (J. González-León P.C., V. Luca, 2011), y tecnologías con aditivos químicos (Silva H.M.R.D. *et al.*, 2012).

La tecnología a base de agua con proceso de espuma, siendo 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 reduce la viscosidad del mismo. Esta tecnología proporciona una energía adicional al sistema logrando un mejor cubrimiento de los agregados (Silva H.M.R.D. *et al.*, 2012).

Los aditivos orgánicos, los cuales generalmente utilizan cera, se adicionan al ligante cuando la temperatura de éste sube por encima de la temperatura de fusión de las ceras; estos aditivos usualmente hacen que baje la viscosidad del ligante (Association E.A.P., 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 (Rubio M.C. *et al.*, 2011).

El desarrollo de la tecnología de la secuencia de bitúmenes duros y blandos fue desarrollado por Shell Bitumen en colaboración de Kolo Veidekke en Noruega en el año 1996, añadiendo a la mezcla componentes duros y blandos para reducir la temperatura de producción de la mezcla asfáltica. Kolo Veidekke llevó este trabajo hacia un nuevo enfoque, añadiéndole el componente del bitumen duro como la espuma (D'Angelo J. *et al.*, 2008). 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 un grado de desempeño deseado (D'Angelo J. *et al.*, 2008).

Los aditivos químicos no utilizan espuma, ni la reducción de la viscosidad para bajar la temperatura de la mezcla y la compactación, sino que 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 M.C. *et al.*, 2011). En los aditivos químicos se encuentran otro tipo de tecnología, diferente a las anteriores mencionadas. Es decir, las tecnologías anteriores modifican la densidad del ligante, mientras que los químicos actúan en la interface mineral-ligante. Por esta razón, este tipo de aditivos son usados en pequeñas cantidades que van de 0.3% a 0.6% por peso del ligante (J. González-León P.C., V. Luca, 2011).

Al reducir la temperatura de la mezcla con estos productos y tecnologías para mezclas tibias, los mayores beneficios que se obtiene son la reducción de energía usada en la producción de las mezclas asfálticas, y la disminución de las emisiones de CO₂ (entre 30% y 40%), SO₂ (aproximadamente 35%), compuestos orgánicos volátiles (aproximadamente 50%), CO (entre 10% y 30%), NOx (entre 60% y 70%), y cenizas (entre 20% y 25%) durante el mismo proceso (Estakhri et al. 2009).

Este trabajo de Grado, titulado “Caracterización física de ligantes asfálticos con aditivo CECABASE RT[®] para mezclas tibias”, se basa específicamente en el uso de un aditivo químico llamado CECABASE RT[®], del grupo Arkema y suministrado por Shell Colombia, el cual se presenta en forma líquida, y es adicionado al ligante en porcentajes de 0.3% a 0.5% del peso del asfalto. Este aditivo ha sido usado en Europa, donde se ha encontrado una reducción en la temperatura de producción de la mezcla entre 20% y 50%, y en la temperatura de colocación aproximadamente de 40° C (CECA w., 2011). El aditivo presenta su reacción en la

interface ligante-agregado, mejorando la trabajabilidad y cohesión de la mezcla (J. González-León P.C., V. Luca, 2011).

2.2 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS MATERIALES

2.2.1 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 G., 1994). Estas dos características se pueden intercambiar como se muestra en la Figura 1.

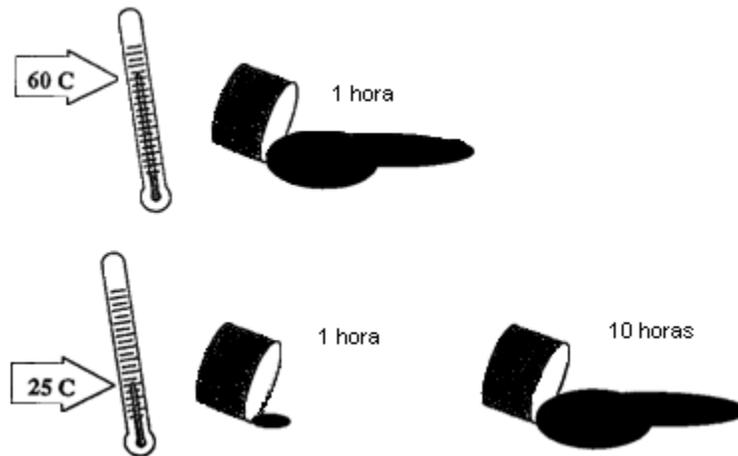


Figura 1 Comportamiento del Cemento asfáltico, bajo características de Temperatura y Tiempo.

Fuente: (Speier G., 1994)

El cemento asfáltico es un material visco-elástico, debido a que a altas temperaturas se comporta como un fluido viscoso, y a bajas temperaturas se comporta como un sólido elástico. En la Figura 2 se muestra el comportamiento del ligante en ambos estados (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004).

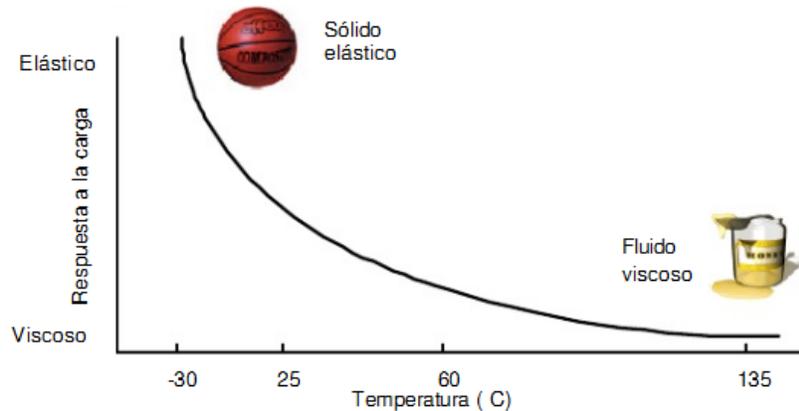


Figura 2 Comportamiento Visco-Elástico del Cemento Asfáltico

Fuente: (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004).

2.2.2 Agregados Pétreos

Los materiales pétreos para la elaboración de mezclas asfálticas son por lo general de origen natural, los cuales son directamente extraídos de depósitos, o pueden ser materiales pétreos tratados, los cuales son agregados naturales que han sido clasificados en fracciones según su tamaño, lavados, y pueden ser cribados y/o triturados parcial o totalmente para mejorar sus características de comportamiento en la mezcla asfáltica (García M.A.O., 2010).

La textura de los agregados es importante para la mezcla; por ejemplo: si es rugoso y con buena cubricidad, tienen más resistencia que los agregados lisos redondeados (Speier G., 1994). Debido a que las partículas angulares tienden a trabarse entre sí, esto les da consistencia, a diferencia de las redondeadas, las cuales tienden a deslizarse unas sobre otras. La textura afecta la mezcla cuando la masa de agregados es cargada, generando un plano por el cual las partículas tienden a ser desplazadas (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004); es en este plano donde los esfuerzos exceden la resistencia al corte de la masa del agregado, y es

en ese momento cuando la resistencia del agregado es importante para el desempeño de una carpeta asfáltica, ya que provee en gran medida la resistencia a la deformación permanente de la mezcla (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004).

2.2.3 Tipo de Aditivo CECABASE RT[®]

El aditivo utilizado en esta investigación fue CECABASE RT[®], el cual es de tipo químico. CECABASE RT[®] es un producto patentado por CECA, miembro de la compañía Arkema Group, y fue desarrollado a principios del año 2000, por el equipo de Gilles BARRETO en el centro de investigación de Arkema (CRRRA), cerca a Lyon, Francia (Hajj E.Y., Ph.D. y Cortez E.M., 2011). Este aditivo, el cual el 50% de su materia prima es renovable, es un agente de moléculas tensoactivas 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 (J. González-León P.C., V. Luca, 2011).

Además de las ventajas ya mencionadas, el aditivo CECABASE RT[®] genera otras al ser utilizado en la producción de mezclas asfálticas tibias. Por ser un líquido, 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 bitumen 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 (GROUP V.-C.A., 2008).

Otras características del uso del aditivo CECABASE RT[®] se encuentran con más detalle en la ficha técnica y en la hoja de datos de seguridad “*Safety Data Sheet*” en el ANEXO G suministrada por NOVAKEM SA, agente de Arkema en Colombia. Estos datos son la identificación de peligros en su uso, composición e información de ingredientes, su correcta manipulación y almacenamiento, sus propiedades físicas, químicas, estabilidad y reactividad, entre otras.

2.3 MARCO CONCEPTUAL BASADO EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ligantes utilizados en esta investigación para analizar los beneficios de CECABASE RT[®] corresponden a ligantes con penetración 60/70 y 80/100 producidos por ECOPETROL en la refinería de Barrancabermeja, los cuales fueron proporcionados por Shell Colombia.

En la Tabla 1 se presentan los ensayos de caracterización que se realizaron para la clasificación de estos ligantes. A continuación se presenta una breve descripción de cada ensayo.

Tabla 1. Ensayos de Caracterización del ligante

Ensayo de Caracterización	Norma INVIAS
Ductilidad de los Materiales Asfálticos	INV E-702-07
Penetración de los Materiales Asfálticos	INV E-706-07
Gravedad específica de los Materiales Asfálticos Sólidos y Semisólidos (Método del Picnómetro)	INV E-707-07
Punto de ignición y llama Mediante la Copa Abierta de Cleveland	INV E-709-07
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 las Propiedades Reológica de los ligantes Asfálticos Mediante el Reómetro de Corte Dinámico (DSR)	INV E-750-07
Estabilidad al almacenamiento de asfaltos	INV E- 726-07

Fuente. Normas INVIAS (INVIAS I.N.V., 2007)

2.3.1 Ensayo de Ductilidad

Una de las propiedades que tienen los ligantes es su capacidad de mantener su coherencia bajo grandes deformaciones inducidas por el tránsito (León H. y Lozano A., 2005). El ensayo de ductilidad se utiliza para medir la consistencia de un determinado cemento asfáltico, midiendo su resistencia a la ruptura por medio del alargamiento de una parte de la probeta que lo contiene.

El ensayo consiste en someter una probeta del material asfáltico a tracción, en condiciones determinadas de velocidad y temperatura, en un baño de agua de igual densidad. La ductilidad se define como la distancia máxima, expresada en centímetros, que se estira la probeta hasta el instante de la rotura.

Este ensayo muestra que, los ligantes que tienen mayor ductilidad son más adhesivos que los ligantes que no cuentan con esta característica. Este resultado es importante para conocer el comportamiento del ligante con el aditivo.



Figura 3. Equipo de Ductilidad

2.3.2 Ensayo de Penetración

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

En este ensayo empezó siendo un ensayo empírico usado para determinar la consistencia del producto bituminoso a temperaturas medias de servicio. Usualmente se mide a 25° C, siendo esta la temperatura media de servicio. Los resultados de este ensayo sirven para seleccionar el tipo de ligante adecuado según el clima y el tránsito en la vía.

Este ensayo se realizó a una temperatura de 25° C, con una aguja de 50 gramos, y un tiempo de caída de 5 segundos, como se referencia en la norma INV E-706. La referencia del penetrómetro utilizado es Kohler.



Figura 4. Penetrómetro

2.3.3 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. Este ensayo se realizó para determinar si el ligante era compatible con el diseño de mezcla propuesto.

2.3.4 Punto de ignición y llama

Al ser el asfalto un derivado del petróleo y tener propiedades volátiles, éste ensayo se quiere para determinar la temperatura a la cual el ligante puede calentarse de forma segura sin que se presente llama. Esta temperatura debe ser menor a la temperatura en la cual el asfalto entra en combustión (León H. y Lozano A., 2005).

El punto de ignición es la temperatura registrada en el momento en el cual, al pasar una llama sobre el material asfáltico, se produce una inflamación o chispa entre el asfalto y la llama; y el punto de llama es la temperatura registrada cuando se observa una llama constante debido a los vapores producidos por el asfalto. Aunque la temperatura a la cual el cemento asfáltico genera la chispa es mucho más alta que la temperatura de manejo del ligante, siempre es importante conocerla y controlarla por razones de seguridad, debido a que el producto puede sufrir alguna contaminación durante el transporte de la refinería al sitio de almacenamiento en planta u obra.

Este ensayo se le realizó sólo a la muestra de ligante sin modificar. El ensayo se realizó con la seguridad necesaria para evitar cualquier accidente, y se siguió el procedimiento de la norma INV E-709.



Figura 5. Equipo de punto de Ignición y llama

2.3.5 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 (León H. y Lozano A., 2005). Por esta razón, el punto de ablandamiento se debe determinar por medio de un método arbitrario fijo, pero definido, 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 incrementa 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.



Figura 6. Equipo de punto de ablandamiento

2.3.6 Estabilidad al Almacenamiento

Este ensayo se realiza para determinar la estabilidad de asfaltos modificados generalmente con polímeros, los cuales almacenados a temperaturas elevadas pueden presentar procesos de separación de fases tales como sedimentación o cremado, en función de sus densidades, como resultado de la dispersión incorrecta del aditivo o por incompatibilidad entre sus componentes (León H. y Lozano A., 2005).

En el procedimiento que se detalla en la Norma INV E-726-07, el cual se utiliza una muestra del ligante modificado, contenido en un recipiente conveniente, se somete a la acción de temperatura elevada 165° C durante 5 días

determinándose, al final de este tiempo, el punto de ablandamiento (norma INV E – 712), la penetración (norma INV E – 706), u otras características especificadas, en partes de muestra tomadas en la zona superior e inferior del recipiente, el resultado de estabilidad al almacenamiento de un ligante modificado se expresará como diferencia entre las penetraciones y entre los puntos de ablandamiento, el cual debe cumplir con las especificaciones del artículo INV 400-07, tabla 400.4 en el cual la máxima diferencia del punto de ablandamiento es de 5° C.



Figura 7. Estabilidad al almacenamiento de ligante con CECABASE RT®

2.3.7 Viscosidad Rotacional

La viscosidad se define como la resistencia que ofrece un fluido a la deformación, debida al rozamiento interno de las moléculas (León H. y Lozano A., 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. La agitación del ligante que precede a las mediciones de viscosidad debe controlarse cuidadosamente.

Este ensayo se realiza para determinar la fluidez del asfalto a determinadas temperaturas. En esta investigación se tomaron siete (7) temperaturas (60° C, 100° 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.



Figura 8. Viscosímetro Rotacional

2.3.8 DSR

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.

Este ensayo se realiza en un intervalo de temperaturas entre 25° C y 65° C, para determinar las propiedades lineales visco-elásticas de los ligantes. Un material es elástico cuando el ángulo de fase igual a cero ($\delta = 0^\circ$), un material viscoso cuando $\delta = 90^\circ$, y un material visco-elástico cuando se encuentra entre estos dos valores. Este procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos de la norma INV E-750.



Figura 9. Reómetro de corte directo

2.3.9 Mezcla Asfáltica

La mezcla asfáltica es la combinación entre un ligante asfáltico y un agregado mineral. El ligante actúa como un agente aglutinante de partículas en una masa cohesiva, no es permeable al agua, lo que hace que este en la mezcla también actúe como impermeabilizante; por otro lado, el agregado actúa como el esqueleto pétreo, aportando resistencia y rigidez al sistema (Silva H.M.R.D. *et al.*, 2012). Para entender mejor el comportamiento de las mezclas asfálticas es importante considerar los tipos básicos de deterioro, como los son la deformación permanente, la resistencia a la fatiga y por bajas temperaturas.

La deformación permanente o ahuellamiento de la estructura de un pavimento es el deterioro producido por la aplicación de cargas. Este daño se genera principalmente por dos causas: la primera por fracturamiento y reacomodación de partículas en las capas granulares no ligadas, y la segunda por la acumulación de deformaciones en las capas asfálticas causadas por la baja resistencia al corte de mezcla asfáltica, la cual es incapaz de soportar las cargas repetitivas a las que está sometida. El mayor aporte de resistencia a la deformación permanente de la mezcla proviene del agregado; sin embargo, el ligante asfáltico contribuye también de forma significativa (Banerjee A. *et al.*, 2012).

La fisuración por fatiga, la cual es un tipo de deterioro que se produce por las cargas repetitivas del tránsito, se origina generalmente en la huella de los vehículos y se conoce como “piel de cocodrilo”. Este daño es causado por numerosos factores como drenajes deficientes, colocación de capas de pavimento muy delgadas y con grandes deflexiones, entre otros, los cuales generan esfuerzos de tensión horizontales en la fibra inferior de la capa (Rodríguez A.P., 2010). La fisuración por bajas temperaturas es causada por condiciones adversas

del medio ambiente, se caracteriza por fisuras transversales que se producen cuando el pavimento se contrae debido a las bajas temperaturas, generando esfuerzos de tracción; en este fenómeno, el ligante asfáltico juega un rol importante debido a que los ligantes asfálticos duros son más propensos a la fisuración por bajas temperaturas que los blandos, así que resulta mejor seleccionar un ligante que no sea muy propenso al envejecimiento, y debe controlarse el contenido de vacíos de aire para que éste no resulte excesivamente oxidado (Speier G., 1994).

2.3.10 Diseño de Mezcla Asfáltica SUPERPAVE

La metodología Superpave (por las siglas en inglés de **Superior Performing Asphalt Pavement**) se desarrolló como resultado de la búsqueda de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos (Speier G., 1994). Esta tecnología especifica tanto el cemento asfáltico como el agregado mineral para desarrollar diseños de mezclas asfálticas, y poder analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento, Bitumix CVV Ltda., 2005 (CVV B., 2005).

Esta metodología está enfocada en producir una mezcla que se comporte adecuadamente. El primer paso del análisis Superpave involucra la selección cuidadosa de los materiales y su proporcionamiento volumétrico, donde se evalúan sus componentes en forma individual para luego observar y valorar su interacción cuando se encuentren en la mezcla (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004). En la Tabla 2 se presentan los niveles de análisis del método Superpave.

Tabla 2 Niveles de análisis de Método Superpave
Fuente:(CVV B., 2005).

Transito (ESAL)	Nivel de Diseño	Requisitos de Ensayo
$ESAL < 10^6$	Primer Nivel de Análisis	Diseño Volumétrico
$10^6 < ESAL < 10^7$	Análisis Intermedio	Diseño Volumétrico y Pruebas de predicción del comportamiento
$10^7 < ESAL$	Análisis Completo	Diseño Volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento adicionales

A continuación se presenta la aplicación que se puede seguir, de acuerdo a los niveles de análisis del método Superpave, para la selección de materiales y su proporcionamiento volumétrico en la elaboración de mezclas asfálticas en Colombia.

2.3.10.1 Primer Nivel

Este nivel requiere el diseño volumétrico, el cual involucra los siguientes aspectos:

Selección del tipo de asfalto. Para la selección del tipo de asfalto se pueden seguir las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en su Artículo 400-96: “Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos”. En la sección 400.2.2 para Cemento Asfáltico, se exponen las especificaciones para el cemento asfáltico que se mencionan a continuación (Speier G., 1994).

El ligante asfáltico a emplear en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente puede ser de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía. En la Tabla 3 se presentan estas recomendaciones, según la Tabla 400.2 de la Normatividad INVIAS; y en la Tabla 4 los requisitos de calidad del cemento asfáltico, según se establecen en la Tabla 400.3 de la especificación.

Tabla 3 Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente

Fuente: INVIAS 2007, Tabla 400.2

Tránsito de Diseño 10 ⁶ ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24° C +	15 - 24° C	15° C
5 +	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

La especificación del INVIAS contempla la modificación del cemento asfáltico mediante la adición de activantes, rejuvenecedores, polímeros, asfaltos naturales o cualquier otro producto. De igual manera, ésta contempla la modificación del cemento asfáltico confirmado por la experiencia del ingeniero. Para dichos casos, la especificación establece el tipo de adición y las condiciones que debe cumplir el ligante modificado y la mezcla asfáltica.

Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico

Fuente: INVIAS 2007, Tabla 400.3

Característica del ensayo	Unidad	Norma de ensayo INVIAS	Grado de penetración			
			60-70		80-100	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706-07	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724-07	-1	+1	-1	+1
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-702-07	100	-	100	-
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709-07	230	-	230	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 85 minutos)	%	E-720-07	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida de calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706-07	52	-	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por el calentamiento en la película delgada en movimiento (E-720)	°C	E-712-07	-	5	-	5

Selección de las propiedades de los agregados. Los agregados deben cumplir dos propiedades principales, así:

Propiedades de consenso: Son aquellas que se consideran críticas para alcanzar un elevado desempeño de la mezcla asfáltica. Éstas son características como la angulosidad del agregado grueso, angulosidad del agregado fino, partículas alargadas, aplanadas, y contenido de arcilla, las cuales son requerimientos de calidad de los agregados con propiedades de consenso (Speier G., 1994).

Propiedades de origen del agregado: Son las del agregado con características de: tenacidad, durabilidad, y materiales deletéreos. Para hallar estas características se usan los siguientes ensayos: la máquina de Los Ángeles, acción del sulfato de sodio, y determinación de arcilla, respectivamente (Speier G., 1994).

Granulometría: Superpave ha modificado el enfoque de la metodología Marshall para poder especificar la granulometría. Este emplea el exponente 0.45 para la curva granulométrica para definir la gradación permitida (de acuerdo con la ecuación de Fuller), mediante la técnica grafica única para juzgar la distribución de los tamaños acumulados de partículas de una mezcla de agregados (Speier G., 1994). En esta curva granulométrica, en la ordenada están los porcentajes que pasan los diferentes tamaños, y en las abscisas las aberturas de los tamices (en mm) elevadas al exponente 0.45, como en el ejemplo de la Figura 10. Normalmente en este tipo de graficas la escala está en función de tamaño de la malla, como se muestra en la Figura 11 (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004).

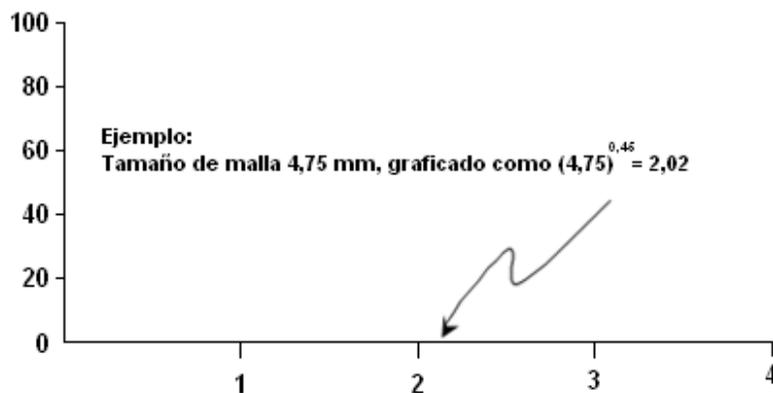


Figura 10 Ejemplo de cómo se Grafican las abscisas
Fuente: Garnica et al., 2004.

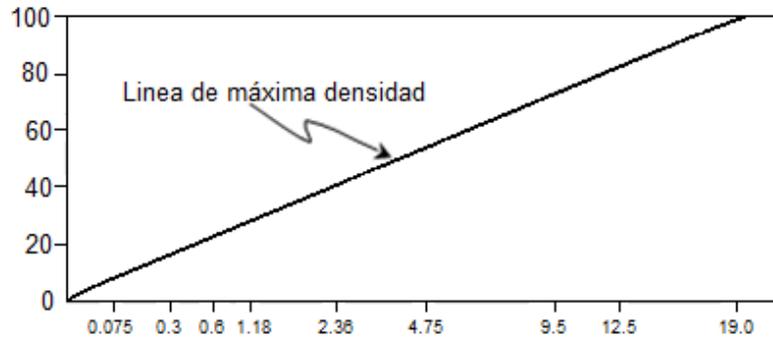


Figura 11 Graduación de máxima densidad para tamaño de 19mm

Fuente: Garnica et al., 2004.

Para especificar la granulometría del agregado se emplean dos conceptos adicionales: puntos de control y zona restringida. Los puntos de control son los pasos obligados para la curva granulométrica y corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm), y un tamaño de finos de (0.075 mm) (Speier G., 1994); y en la parte restringida se ubican los tamaños intermedios (4.75 mm o 2.36 mm) y 0.3 mm, donde se formará una banda por donde no deberá pasar la curva granulométrica. Las granulometrías que pasan se llaman “*humped graduation*” (graduaciones con joroba), ya que la forma de la curva es como una joroba que pasa por aquella zona (Speier G., 1994). Estas curvas indican una mezcla con mucha arena fina en relación al total de la arena. Las granulometrías que violan la zona restringida tienen una estructura débil, por eso dependen demasiado de la rigidez del cemento asfáltico para alcanzar una mezcla con resistencia al corte. Esto se muestra en la Figura 12.

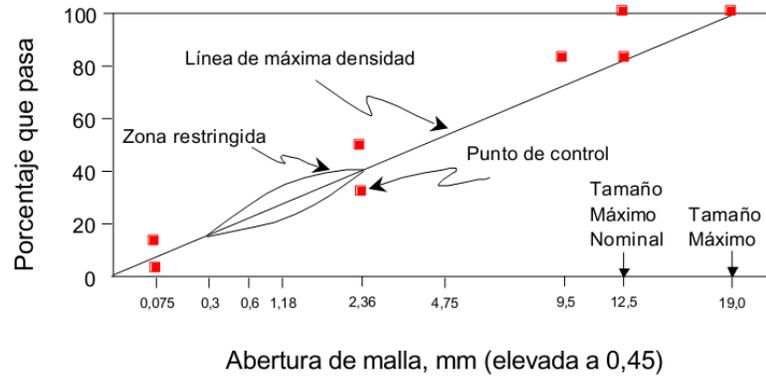


Figura 12 Límites de Granulometrías Superpave

Fuente: Garnica et al., 2004.

Para la metodología Superpave, el diseño de la estructura del agregado que pase por los punto de control y evite la zona restringida está cumpliendo con los requerimientos de dicha tecnología (Speier G., 1994). En la Tabla 5 a la Tabla 7 se muestran las especificaciones de los puntos de control y zona restringida para los tamaños máximos nominales de los agregados más usados (Speier G., 1994).

Tabla 5 Graduaciones para mezcla Superpave.

Fuente: Speier G., 1994

Tamaño Máximo Nominal	Tamaño Máximo
37.5	50.0
25.0	37.5
19.0	25.0
12.5	19.0
9.5	12.5

Tabla 6 Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 19 mm

Fuente: Speier G., 1994.

Malla (mm)	Puntos de Control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25.0		100.0		
19.0	90.0	100.0		
12.5		90.0		
2.36	23.0	49.0	34.6	34.6
1.18			22.3	28.3
0.600			16.7	20.7
0.300			13.7	13.7
0.075	2.0	8.0		

Tabla 7 Especificación de gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal de 12.5 mm

Fuente: Speier G., 1994.

Malla (mm)	Puntos de Control		Zona restringida	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
19.0		100.0		
12.5	90.0	100.0		
9.5		90.0		
4.75				
2.36	28.0	58.0	39.1	39.1
1.18			25.6	31.6
0.600			19.1	23.1
0.300			15.5	15.5
0.075	2.0	10.0		

Selección del contenido de asfalto: Esta actividad se basa en la estimación de las propiedades volumétricas de la mezcla, como son el contenido de vacíos de la mezcla V_a , vacíos en el agregado mineral VMA , y vacíos llenos de asfalto VFA .

La selección del contenido óptimo de asfalto depende de dos factores: estos son los criterios establecidos para la compactación, y el número de giros aplicados (Gómez López J.A. *et al.*, 2003). La compactación en el laboratorio se

realiza con el compactador giratorio Superpave (SGC); en este caso se pueden considerar como parámetros constantes el esfuerzo vertical, el ángulo de giro, y la velocidad de giro; para seleccionar el número de giros se debe tener en cuenta la temperatura promedio del lugar y el número de ejes equivalentes establecidos en el diseño (Gómez López J.A. *et al.*, 2003). En la Tabla 8 se presentan los números de giro de compactación recomendados en función del tránsito y la temperatura.

Tabla 8 Número de giros de compactación para el diseño Superpave
Fuente: Speier G., 1994.

ESAL's de diseño (millones)	Temperatura promedio del aire para diseño											
	< 39° C			39 - 40° C			41 - 42° C			43 - 44° C		
	Nini	Ndes	Nmáx	Nini	Ndes	Nmáx	Nini	Ndes	Nmáx	Nini	Ndes	Nmáx
<0,3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0,3 - 1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1 - 3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3 - 10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10 - 30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30 - 100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
>100	9	143	235	10	158	262	10	165	275	10	172	288

Requerimientos volumétricos de la mezcla: estos son los vacíos de aire V_a , los vacíos en el agregado mineral VMA , y los vacíos llenos de asfalto VFA .

El contenido de vacíos de aire es una de las propiedades más importantes, ya que esta se usa como base en la selección del contenido del ligante. Los vacíos en el agregado mineral son la suma del volumen de vacíos de aire y del asfalto efectivo; los valores mínimos vacíos en el agregado mineral están en función del tamaño nominal del agregado (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004); en la Tabla 9 se presentan estos valores para un porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4%. Los vacíos llenos de asfalto son el volumen del ligante asfáltico efectivo expresado como porcentaje de VMA ; éstos están en función del nivel de tránsito; en la Tabla 10 se

muestra el rango aceptable de *VFA* para un porcentaje de diseño de vacíos de aire del 4% (Garnica Anguas P. *et al.*, 2004).

Tabla 9 Criterio para VMA

Fuente: Speier G., 1994.

Tamaño máximo de Agregado	Porcentaje VMA mínimo
9.5 mm	15.0
12.5 mm (1/2")	14.0
19.0 mm	13.0
25.0 mm	12.0
37.5 mm	11.0

Tabla 10 Criterio para VFA

Fuente: Speier G., 1994).

Transito, ESAL's (Millones)	Porcentaje de VAM de diseño
< 0.3	70-80
< 1	65-78
< 3	65-78
< 10	65-75
< 30	65-75
< 100	65-75
> 100	65-75

Susceptibilidad a la humedad: Este ensayo se utiliza para identificar la combinación de cemento asfáltico y agregado que es susceptible a la acción del agua y para medir la efectividad de los aditivos anti-desprendimiento o para mejorar la adherencia; este ensayo se realiza según la norma para determinar la resistencia de mezclas asfálticas compactadas al daño inducido por humedad (CVV B., 2005).

Parámetros Volumétricos: Las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica son: vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenos de asfalto (VFA), y el contenido de asfalto efectivo (P_{be}). Estos parámetros son los que proporcionan una señal del funcionamiento de la mezcla asfáltica (Speier G., 1994).

El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Para medir la gravedad específica existen tres métodos que varían según la gravedad específica que se desee determinar: gravedad específica neta G_{sb} , gravedad específica aparente G_{sa} , y gravedad específica efectiva G_{se} .

La gravedad específica neta G_{sb} es la proporción del peso en el aire de una unidad de volumen de un material permeable; incluye los vacíos permeables e impermeables del material a una temperatura indicada (Speier G., 1994). La gravedad específica aparente G_{sa} es la proporción del peso en el aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada (Speier G., 1994). La gravedad específica efectiva G_{se} es la proporción en peso en el aire de una unidad de volumen de un material permeable, excluyendo los vacíos permeables al asfalto a una temperatura indicada (Speier G., 1994). Para el procedimiento de diseño de la mezcla asfáltica, se calculan los valores de VMA en términos de gravedad específica neta de los agregados G_{sb} .

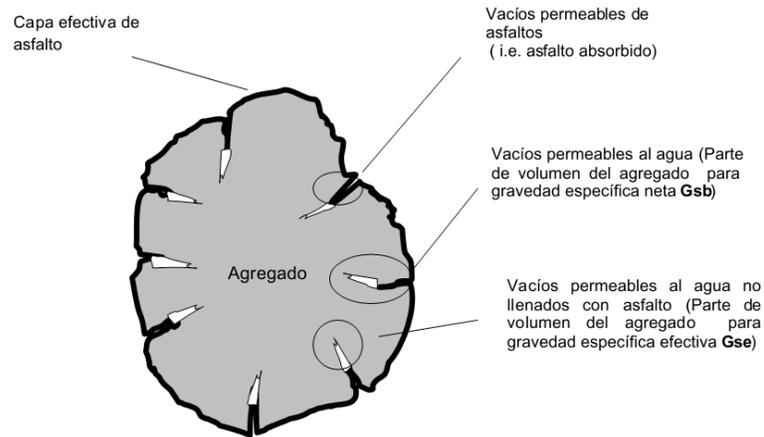


Figura 13 Gravedad específica del agregado mineral.

Fuente: Speier G., 1994

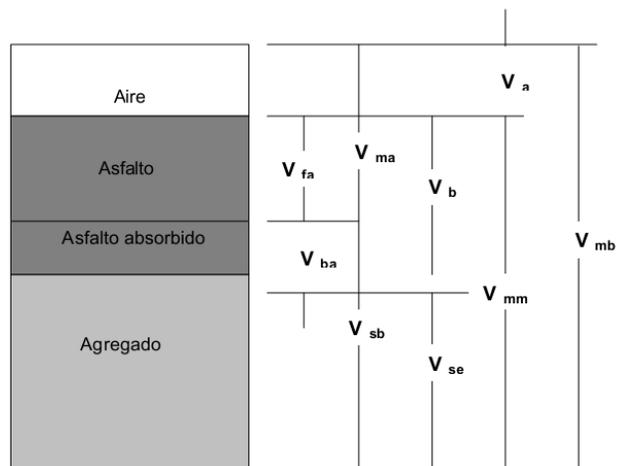


Figura 14 Parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica

Fuente: Speier G., 1994

Donde:

V_{ma} : Volumen de vacío en el agregado mineral.

V_{mb} : Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} : Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} : Volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a : Volumen de vacíos de aire.

V_b : Volumen de asfalto.

V_{ba} : Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} : Volumen de agregado mineral (gravedad específica de la masa).

V_{se} : Volumen de agregado mineral (gravedad específica efectiva).

Para conocer los parámetros volumétricos de una mezcla asfáltica se debe comprender las siguientes definiciones.

Gravedad específica neta: ésta se determina si el agregado está compuesto por agregado grueso, fino y filler (García M.A.O., 2010).

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

G_{sb} : Gravedad específica neta para el agregado total.

P_1, P_2, P_n : Porcentajes individuales por masa de agregado.

G_1, G_2, G_n : Gravedad específica neta individual del agregado.

Gravedad específica efectiva del agregado G_{se} : se usa para determinar la gravedad específica máxima de una mezcla asfáltica G_{mm} . La gravedad efectiva del agregado incluye todos los espacios de vacíos en las partículas de agregado, excepto aquellos que absorben asfalto.

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

- G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.
 G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla (sin vacíos de aire).
 P_{mm} : Porcentaje de masa del total de mezcla suelta (igual a 100%).
 P_b : Contenido total de asfalto (sobre el peso de la mezcla).
 G_b : Gravedad específica del asfalto.

El valor de la gravedad específica efectiva G_{se} de un agregado debe estar entre su gravedad específica neta G_{sb} y su gravedad específica aparente G_{sa} . El valor será incorrecto cuando dicha gravedad está por fuera de este intervalo.

Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica G_{mm} : esta gravedad se requiere para determinar el contenido de asfalto, y para calcular el porcentaje de vacíos de aire para cada contenido de asfalto. Esta se determina mediante la norma de ensayo INV E-735-07. Después de calcular la gravedad específica máxima medida, y promediado los resultados de la G_{se} , la gravedad específica máxima para cualquier contenido de asfalto puede ser obtenida con la Ecuación 3 (Speier G., 1994).

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

- G_{mm} : Gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).
 P_{mm} : Porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta (igual a 100%).
 P_s : Contenido de agregado, Porcentaje del total de la masa de la mezcla.
 P_b : Contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.
-

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

Absorción del asfalto: es la relación entre las gravedades específicas del agregado, multiplicada por la gravedad específica del asfalto; esta se determina mediante:

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times G_b \quad \text{Ecuación 4}$$

P_{ba} : Asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

G_{se} : Gravedad específica efectiva del agregado.

G_{sb} : Gravedad específica neta del agregado.

G_b : Gravedad específica del asfalto.

Vacíos del agregado mineral: son los vacíos inter-granulares entre las partículas del agregado en una mezcla asfáltica compactada. Se puede determinar en función de la gravedad específica neta del agregado G_{sb} , y se expresa como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica compactada (García M.A.O., 2010).

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

VMA : Vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto)

G_{sb} : Gravedad específica neta del total de agregado

G_{mb} : Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (INV E-733-07)

P_s : Contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

Vacios de aire: son los pequeños espacios de aire entre las partículas del agregado. Este porcentaje puede determinarse de la siguiente forma:

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

V_a : Vacíos de aire en la mezcla compactada (porcentaje del volumen total).

G_{mm} : Gravedad específica máxima.

G_{mb} : Gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada.

Vacios llenos de asfalto: se determina usando:

$$VFA = 100 \times \frac{VMA - V_a}{VMA} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.3.10.2 Nivel Intermedio

Este nivel utiliza como punto inicial el análisis volumétrico del primer nivel. El ensayo establecido para determinar la calidad de la mezcla asfáltica en este nivel es el ensayo de tensión indirecta (CVV B., 2005).

Ensayo de tensión indirecta: este ensayo se utiliza para evaluar la sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas, y así determinar el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este ensayo se basa en someter a compresión diametral una probeta cilíndrica, bajo una carga vertical distribuida uniformemente a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas, hasta alcanzar la falla (CVV B., 2005), y se realiza según la norma INV E-725-07 “Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de Tracción Indirecta (TSR)”.

2.3.10.3 Nivel Avanzado

En este nivel se realizan los pasos de los dos niveles anteriores con una amplia gama de temperaturas. El objetivo de esto es ofrecer un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la mezcla asfáltica, y permitir estimar con gran precisión el comportamiento del pavimento durante el transcurso de su vida útil (CVV B., 2005).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

La base y referencia de este Trabajo de Grado está ligada al cumplimiento de las Normas INVIAS para la caracterización del Ligante-Aditivo. A continuación se presentan las especificaciones para los materiales usados, y los métodos empleados para el cumplimiento de los objetivos.

3.1 Materiales

3.1.1 Tipo de Ligante Asfáltico

Para el presente proyecto se utilizaron cementos asfálticos de Ecopetrol clasificados por penetración como 80-100 y 60-70. Estos se caracterizaron para conocer sus propiedades físicas en estado original y modificados con aditivo CECABASE RT[®] en diferentes porcentajes; posteriormente se escogió el cemento asfáltico con penetración 80-100 por su conveniencia de uso por la temperatura ambiente en la ciudad de Bogotá (Tabla 3).



Figura 15. Ligante asfáltico suministrado por Shell Colombia

3.1.2 Tipo de Agregados

Como se mencionará en el numeral 4.4 de este documento, se encontró que el aditivo químico utilizado no presentó modificaciones considerables sobre el ligante al ser combinado en bajas proporciones, por lo que se decidió investigar su comportamiento en la mezcla asfáltica. Cabe aclarar que este análisis se realizó a modo de verificación, ya que no hacía parte de los objetivos del proyecto.

Los agregados utilizados para la mezcla asfáltica provienen de una cantera representativa de la Ciudad de Villavicencio. Estos son de la mejor calidad posible dentro de los tipos normalmente utilizados para pavimentos asfálticos en la ciudad de Bogotá (Vera J., 2012).

La mezcla de agregados grueso, fino, y del llenante mineral, se ajustó a las exigencias de la especificación INVIAS para una granulometría de mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2.



Figura 16. Agregado Pétreo

3.2 Métodos

Para la caracterización del ligante asfáltico y los agregados pétreos se realizaron los ensayos según las normas técnicas establecidas por el INVIAS en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras - Tomo II; así mismo, para la mezcla asfáltica, se realizaron los ensayos requeridos por la metodología de diseño de mezclas SUPERPAVE, la cual hace uso de la Prensa de Compactación Giratoria y el ensayo TSR.

3.2.1 Compactador Giratorio

A medida de la evolución de las mezclas asfálticas, se han desarrollado diferentes tipos de dispositivos de laboratorio para la compactación. Los aciertos de estos dispositivos se deben a la fabricación de especímenes para la caracterización volumétrica y física. Los compactadores giratorios aplican un esfuerzo de amasado, tal como ocurre en campo, para producir en laboratorio especímenes cilíndrico.

Las primeras compactaciones giratorias fueron a raíz de una investigación sobre el diseño y control de mezclas asfálticas en 1939, en Texas Highway Department, donde después de realizar métodos a prueba y error, se decidió iniciar nuevos métodos que establecieron criterios para métodos realizados en laboratorios. En primer lugar, el método debía ser adaptable para el control de la mezcla tanto en campo como en laboratorio; en segundo lugar, el método debía producir esencialmente la misma densidad o proporción de vacíos, como se obtendría en el pavimento terminado; y en tercer lugar, el método de compactación debía tener métodos de moldeo, los cuales se aproximarían a la degradación del agregado obtenido bajo condiciones de operación (Davila J.M., 2005).

La máquina de pruebas giratorias, primer nombre dado al compactador giratorio, fue desarrollada en respuesta a la experiencia de en años 50's donde el cuerpo de ingenieros GTM mostraron que el impacto del martillo Marshall no simulaba las densidades producidas por las ruedas de aviones pesados. También se creía que las propiedades mecánicas de las pruebas de especímenes producidas por los impactos del martillo Marshall no representaban las propiedades de los especímenes tomados de los pavimentos (Gómez López J.A. *et al.*, 2003).

El compactador Giratorio LCPC de origen francés, fue desarrollado entre los 60's y 70's, el cual incluía la forma de las curvas de densificación giratoria y efectos de la gradación del agregado, aun como contenidos de relleno mineral y propiedades del asfalto sobre la posición de inclinación de la curva. Este compactador aplica un ángulo fijo de un grado (1.00°) y una presión vertical constante 600 kPa, y proporciona seis giros constantes por minuto en el momento de la compactación. La dificultad de compactación se compensa por el aumento del espesor, el cual reduce el esfuerzo de compactación requerido para obtener la densidad (Davila J.M., 2005).

El compactador giratorio Superpave fue creado entre 1987 y 1993 por el Strategic Highway Research Program (SHRP), principalmente para la investigación de cementos asfálticos; y en 1990 incluyeron un área de mezclas asfálticas. Los principales investigadores fueron Harold L. Von Quintus y Brent Rauhut (Gómez López J.A. *et al.*, 2003).

La mayoría de las pruebas sobre mezclas asfálticas estaban enfocadas a modificar el compactador giratorio de 6 pulgadas de Texas; donde varias investigaciones de la FHWA mostraban un ángulo de giro del molde de 1.23° , y no de 1.00° grado como se había especificado en el compactador giratorio LCPC.

Teniendo estos resultados, se especifican los siguientes valores (Tabla 11) para el compactador giratorio SHRP (Gómez López J.A. *et al.*, 2003):

Tabla 11. Valores para el compactador giratorio SHRP

Parámetro	Valor
Presión de consolidación vertical	600 kPa
Angulo de Giro	1.25°
Velocidad de Giro	30 rpm

Es importante destacar que las características de compactación son útiles para predecir las propiedades del pavimento no solo en el momento de la construcción sino también durante la vida útil del pavimento.

Las ventajas de la compactación por amasado son: la simulación mas aproximada a las condiciones de clima y carga, la capacidad de compactar mezclas con grandes agregados, identificar problemas de compactación, y la facilidad para verificar y llevar a cabo el control de calidad de las mezclas asfálticas.

3.2.2 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta TSR

Este método de ensayo se realiza según la Norma INV E-725-07, y establece los procedimientos para preparar y ensayar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. Este método es aplicable a las mezclas asfálticas densas y se usa para evaluar el efecto de la humedad en las mezclas elaboradas con o sin aditivo adhesivo, incluidos líquidos y sólidos pulverulentos.

La susceptibilidad al daño por humedad se establece preparando un grupo de especímenes compactados en el laboratorio de acuerdo con el diseño de mezcla previamente elaborado. Los especímenes son compactados a niveles de vacíos que oscilan entre 6% y 8%. El grupo es dividido en dos subgrupos con contenidos de vacíos aproximadamente iguales; cada espécimen debe tener su par en el otro grupo. Un grupo es mantenido en seco mientras que el otro es parcialmente saturado con agua y acondicionado en un baño de agua. La resistencia a la tracción de cada uno de los subgrupos se determina por la prueba de tracción indirecta. El potencial de daño por humedad es indicado por la relación entre la resistencia a la tensión del subgrupo húmedo y la del subgrupo seco.

Este método de ensayo se puede usar para probar mezclas de concreto asfáltico y determinar el potencial de daño por humedad; para determinar si un aditivo adhesivo es efectivo o no, y encontrar la cantidad óptima de aditivo para maximizar su efectividad. Este método puede ser usado también para evaluar mezclas producidas en planta, con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en campo.

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE EL LIGANTE ASFÁLTICO CON PENETRACIÓN 60/70

A continuación se muestra los resultados obtenidos en laboratorio según las especificaciones de la Tabla 400.3 “Especificaciones del cemento Asfáltico”, del Artículo 400-07 “Disposiciones Generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos”. Es oportuno aclarar que en Colombia existen especificaciones para cementos asfálticos modificados con polímeros y no para ligante que se modifican para elaboración de mezclas asfálticas tibias; es por esto que se decidió tomar como referencia de cumplimiento los valores presentados en la Tabla 400.3 del INVIAS.

Para la combinación Ligante-Aditivo se realizaron cuatro (4) contenidos de aditivo CECABASE RT[®] respecto al peso del ligante. Estos fueron: 0.2%, 0.4%, 0.5%, y 0.7%. Estos valores se escogieron de acuerdo a lo encontrado en la literatura.

En el Anexo A se puede ver en detalle los resultados realizados para la caracterización de ligante asfáltico de penetración 60/70.

4.1.1 Ensayo de Ductilidad

Este ensayo se realizó a una velocidad de 50 ± 2.5 mm/min y a una temperatura de $25 \pm 0.5^\circ$ C. El procedimiento de ensayo seguido se encuentra en la norma INV E-702, y se efectuó por duplicado al ligante normalizado. Estos resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de ensayos de ductilidad 60/70

60/70	Muestra 1	Muestra 2
Medida Inicial	1.4 cm	1.4 cm
Medida Final	>102 cm	>127.5 cm
Diferencia	100.6 cm	126.1 cm

Las dos muestras dieron mayor a 100 cm, el cual corresponde con el valor requerido por la especificación en la tabla 400.3 “Especificaciones del cemento Asfáltico” del Artículo 400-07 de INVIAS.

El ligante ensayado presento un comportamiento de alta ductilidad, esta característica significa que el ligante posee adherencia, sin embargo es mas susceptible a la temperatura.

4.1.2 Ensayo de Penetración

El ensayo de penetración se realizó al ligante 60/70 modificado con los cuatro porcentajes de aditivo, y al ligante sin modificar. Todos los ensayos se realizaron por duplicado. En la Figura 17 se presenta el promedio de las tres penetraciones por muestra con sus respectivos duplicados; es decir, se obtuvieron seis datos para cada porcentaje con el fin de tener un valor estadísticamente representativo del ensayo.

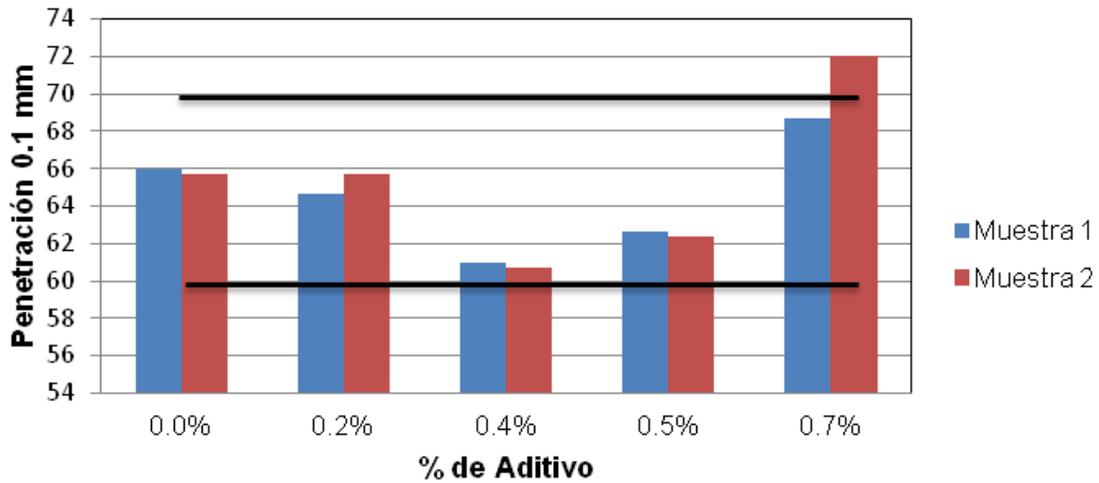


Figura 17. Ensayo de Penetración en Ligante Asfáltico de Penetración 60/70

Los resultados se encuentran en su mayoría dentro del intervalo especificado, es decir, entre 60 y 70 décimas de milímetro para un cemento asfáltico, según la Tabla 400.3 “Especificaciones del cemento Asfáltico, del Artículo 400-07”. En la Figura 18 se presenta la desviación para el promedio de los resultados de penetración.

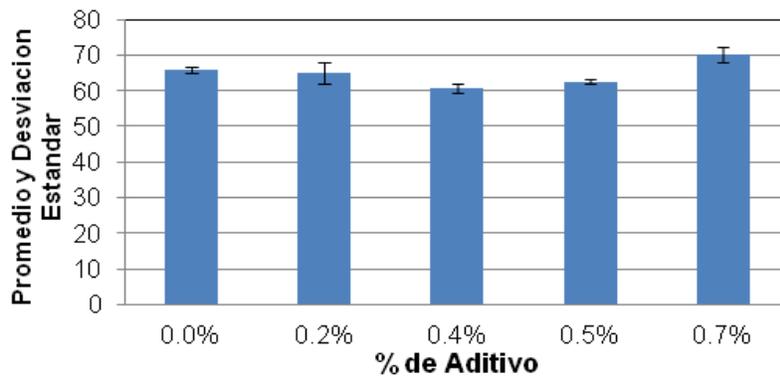


Figura 18. Promedio y Desviación Estándar de Ensayo de Penetración 60/70

4.1.3 Gravedad específica

Se obtuvo un valor de gravedad específica de 1.010 g/cm^3 para el ligante de penetración 60/70, a una temperatura de 25° C .

4.1.4 Punto de ignición y llama

El ensayo de punto de Ignición y Llama se comenzó a una temperatura del ligante de 80° C . Para el ligante asfáltico original de penetración 60/70 se obtuvo una temperatura de ignición de 293° C a 294° C , y una temperatura de llama de 305° C .

4.1.5 Punto de ablandamiento

El ensayo de punto de ablandamiento se realizó al ligante 60/70 modificado con los cuatro porcentajes de aditivo, y al ligante sin modificar. Todos los ensayos se realizaron por duplicado. En ningún momento se repitió este ensayo por encontrarse una diferencia en la temperatura del momento de caída de las dos esferas menor a 1° C . Estos resultados se presentan en la Figura 19.

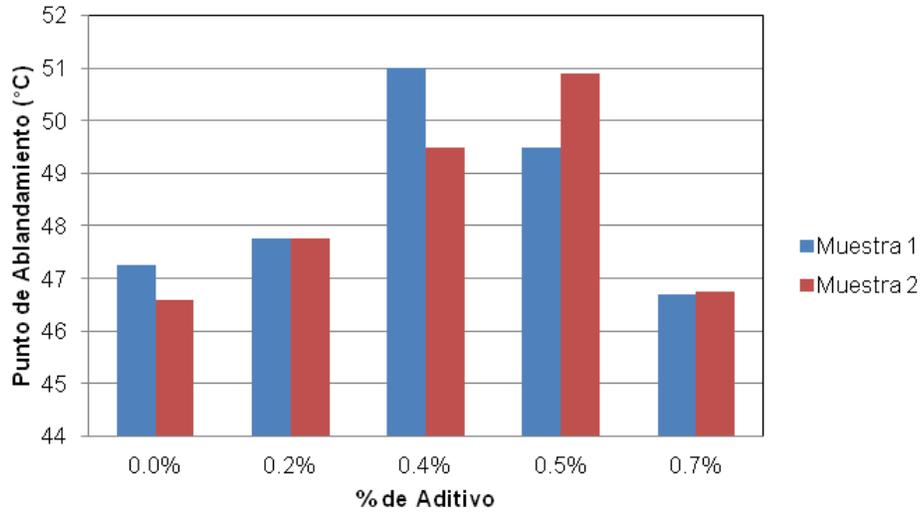


Figura 19. Punto de Ablandamiento Ligante de Penetración 60/70

Al estar el ligante cumpliendo las normas INVIAS, se puede decir que el ligante tiene propiedades de consistencia, las cuales ayudan para ser usados como impermeabilizantes comerciales. En la Figura 20 se presenta la comparación del punto de ablandamiento para los diferentes porcentajes de aditivo.

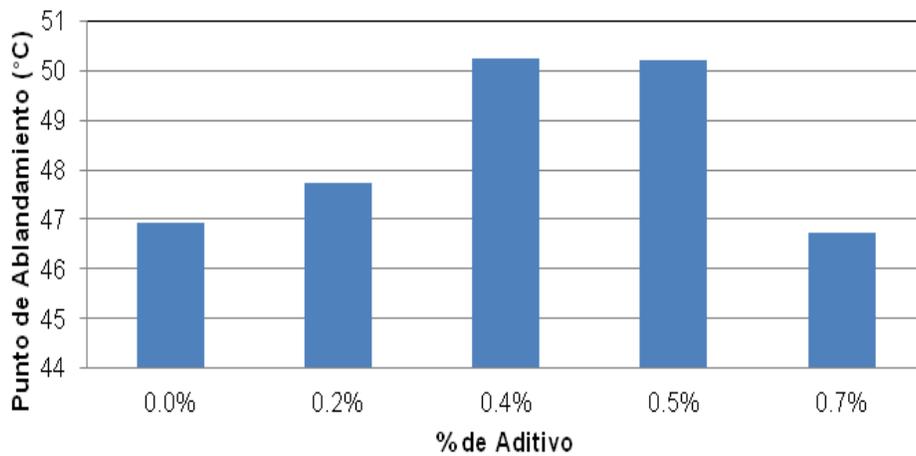


Figura 20. Punto de Ablandamiento de promedio de muestras Ligante de Penetración 60/70

4.1.6 Índice de Penetración

Con el punto de ablandamiento y las penetraciones obtenidas anteriormente podemos sacar el Índice de Penetración (I_p) con la siguiente ecuación:

$$I_p = \frac{20 \times t_{RaB} + 500 \times \log P - 1952}{t_{RaB} - 50 \times \log P + 120} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

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

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

Con esta ecuación, y los resultados mostrados anteriormente, se obtiene el índice de penetración. Los resultados se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Índice de Penetración de Ligante 60/70

Porcentaje (Aditivo)	Promedio Penetraciones	Promedio Punto de Ablandamiento	I_p
0.0%	66	46.9°C	-1.37
0.2%	65	48.1°C	-1.07
0.4%	61	50.3°C	-0.67
0.5%	63	50.2°C	-0.60
0.7%	70	46.7°C	-1.28

De acuerdo a estos resultados, se observa que los ligantes con porcentaje de aditivo CECABASE RT[®] de 0.2%, 0.7% y el ligante sin aditivo, presentan un I_p menor a -1, esto quiere decir que son cementos asfálticos con mayor susceptibilidad a la temperatura, ricos en resinas y con comportamiento algo viscoso; por otro lado, los ligantes con porcentaje de aditivo CECABASE RT[®] de de 0.4% y 0.5% presentaron un I_p entre +1 y -1, lo cual indica que tienen características intermedias, es decir mediana susceptibilidad a la temperatura y tienen un comportamiento entre viscoso y elástico. A este último grupo pertenecen

la mayoría de los cementos asfálticos que se utilizan en la construcción de carreteras.

4.1.7 Viscosidad Rotacional

El ensayo de viscosidad rotacional se realizó al ligante 60/70 modificado con los cuatro porcentajes de aditivo, y al ligante sin modificar, para determinar si se presentaban o no cambios en la viscosidad del ligante al ser modificado con CECABASE RT[®]. Las diferencias entre las curvas reológicas, en los intervalos de las viscosidades establecidas para mezclado y compactación, serían un indicativo de dicho cambio, el cual representaría una reducción en las temperaturas de mezclado y compactación. Sin embargo, y como se muestra en las curvas presentadas en la Figura 21, las viscosidades en los ligantes modificados y sin modificar son relativamente similares, lo que significa que para los porcentajes de aditivo ensayados prácticamente no se manifiesta un cambio significativo de esta propiedad.

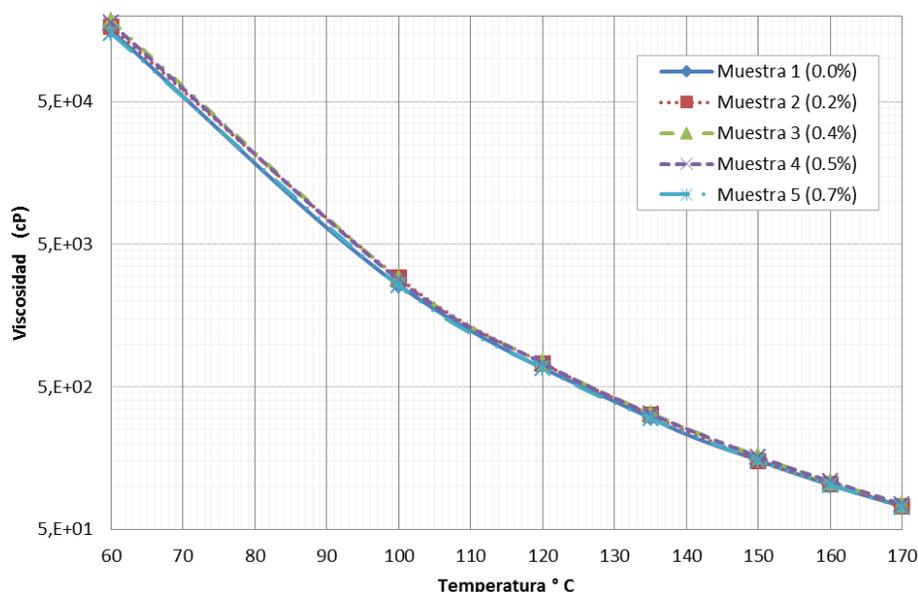


Figura 21. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 60/70

Debido a la similitud de la curva de viscosidad modificada y la original, se realizó una comparación de la viscosidad de los cinco ligantes a una temperatura de 135 ° C. Se escogió esta temperatura ya que es la utilizada por Superpave para la determinación del Grado de desempeño del ligante, ya que es esta la temperatura adecuada para su manipulación en planta. En la Figura 22 se presenta la relación entre la viscosidad a 135° C y el porcentaje de aditivo; en esta figura se observa que la viscosidad se incrementa al adicionar el aditivo al ligante.

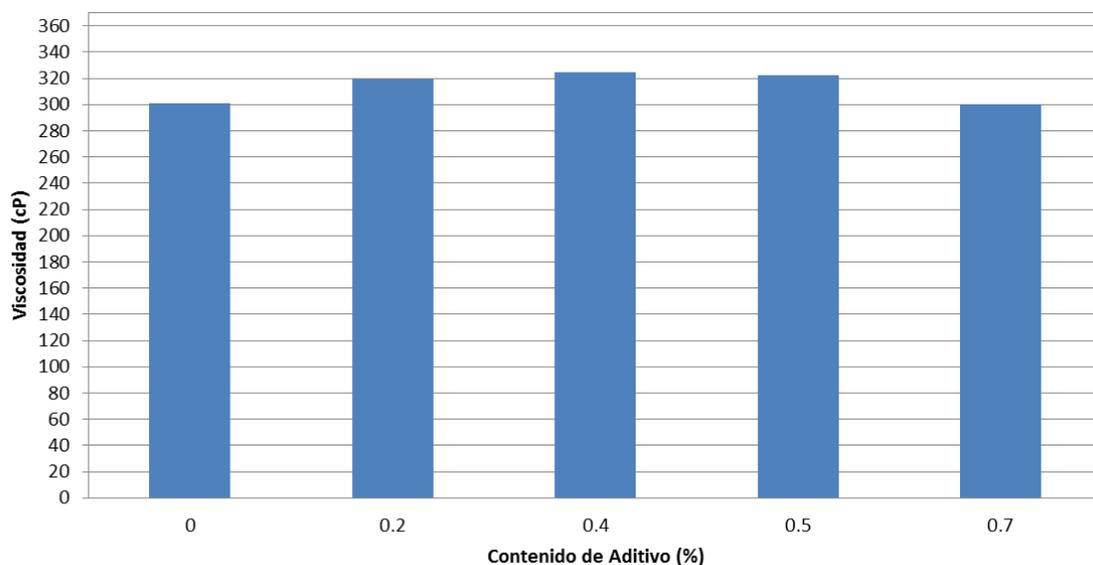


Figura 22. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 60/70 con Temperatura constante cambiando el porcentaje de Aditivo CECABASE RT[®]

4.1.8 DSR

El ensayo de DSR mide las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos haciendo uso del Reómetro de Corte Dinámico. Este ensayo se realizó al ligante 60/70 sin modificar y modificado con 0.4% de CECABASE RT[®]. Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 23, donde se observa que el aditivo no modificó las propiedades del cemento asfáltico.

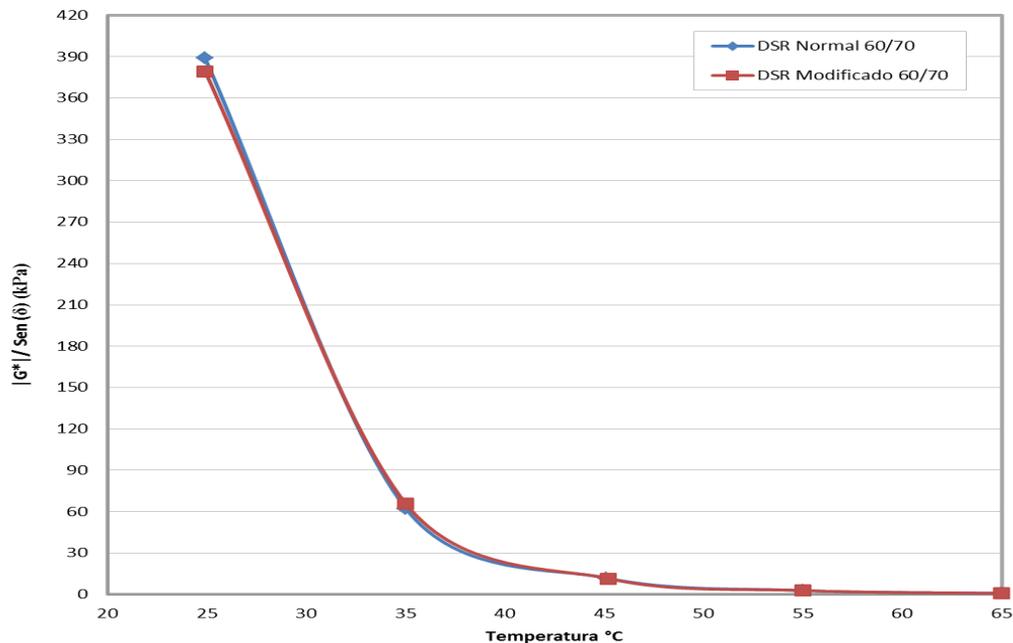


Figura 23. Ensayo DSR con reómetro de corte directo ligante 60/70 sin modificar y con aditivo CECABASE RT[®] al 0.4%

En la Figura 23 se observa que las muestras tienen igual comportamiento ante diferentes cargas en tiempos determinados, donde las propiedades semejantes de flujo y deformación muy son similares. De acuerdo con Lesueur (2009), este tipo de resultados donde no existe una diferencia marcada entre el ligante sin modificar y el modificado permiten establecer una relación homogénea entre el ligante y el aditivo.

4.2 RESULTADOS DE ENSAYOS SOBRE EL LIGANTE ASFÁLTICO PENETRACIÓN 80/100

Para la caracterización de ligante con penetración 80/100 también se realizó combinación Ligante-Aditivo se realizaron cuatro (4) contenidos de aditivo CECABASE RT[®] respecto al peso del ligante. Estos fueron: 0.2%, 0.4%, 0.5%, y 0.7%. Estos valores se escogieron de acuerdo a lo encontrado en la literatura.

En el Anexo B se puede ver detalladamente los cálculos utilizados para la realización de caracterización del ligante asfáltico de penetración 80/100.

4.2.1 Ensayo de Ductilidad

Este ensayo se realizó a una velocidad de 50 ± 2.5 mm/min y a una temperatura de $25 \pm 0.5^\circ$ C. El procedimiento de ensayo seguido se encuentra en la norma INV E-702, y se efectuó por duplicado al ligante normalizado. Estos resultados se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resultados de ensayos de ductilidad 80/100

80/100	Muestra 1	Muestra 2
Medida Inicial	2 cm	2 cm
Medida Final	>160 cm	>160 cm
Diferencia	158 cm	158 cm

Las dos muestras dieron mayor a 100 cm, valor aceptado según la tabla 400.3 Especificaciones del cemento Asfáltico, se puede ver como estos valores son mayores a la ductilidad de un ligante de penetración 60/70. Los ligantes poseen características más adherentes, y pueden variar su consistencia rápidamente al cambiar la temperatura.

4.2.2 Ensayo de Penetración

El ensayo de penetración también se realizó al ligante 80/100 modificado con los cuatro porcentajes de aditivo, y al ligante sin modificar. Todos los ensayos se realizaron por duplicado. En la Figura 24 se presenta el promedio de las tres penetraciones por muestra con sus respectivos duplicados; es decir, se obtuvieron

es decir seis datos para cada porcentaje, con el fin de tener un valor estadísticamente más representativo.

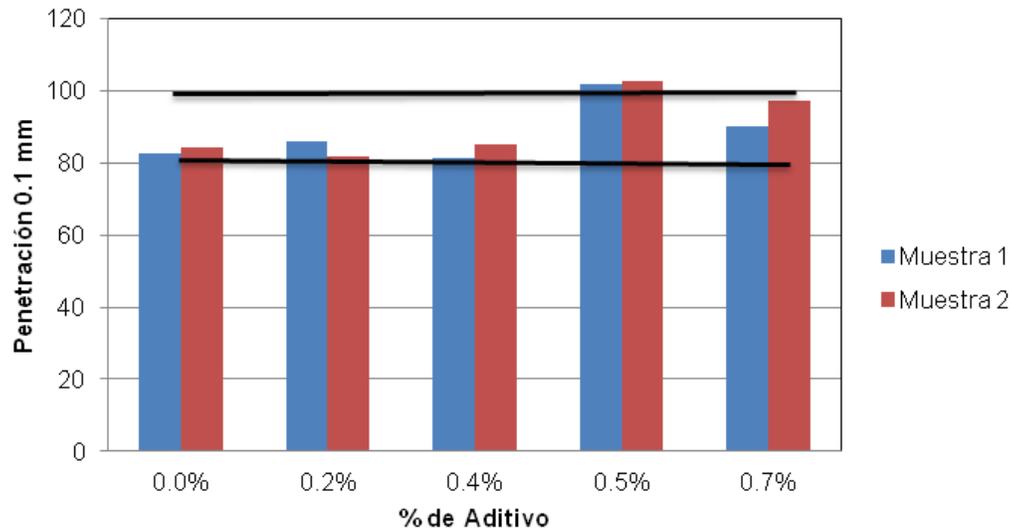


Figura 24. Ensayo de Penetración en Ligante Asfáltico de Penetración 80/100

Los resultados se encuentran en su mayoría dentro del intervalo especificado, es decir, entre 80 y 100 décimas de milímetro para un cemento asfáltico, según la Tabla 400.3 “Especificaciones del cemento Asfáltico, del Artículo 400-07”. En la Figura 25 se presenta la desviación para el promedio de los resultados de penetración

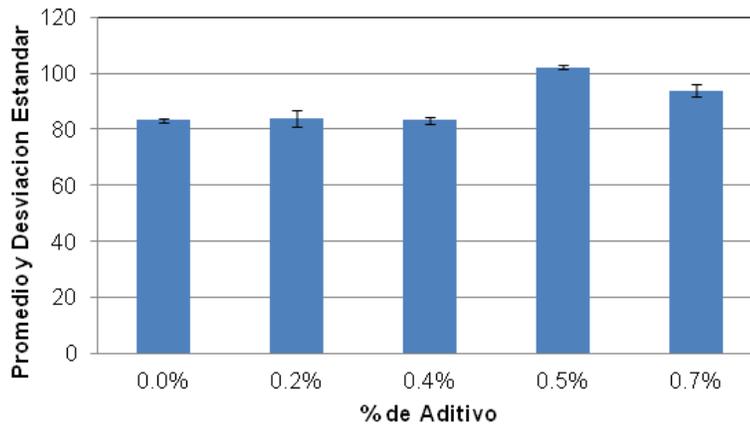


Figura 25. Promedio y Desviación Estándar de Ensayo de Penetración 80/100

4.2.3 Gravedad específica

Se obtuvo un valor de gravedad específica de 1.005 g/cm^3 para el ligante de penetración 80/100, a una temperatura de 25° C .

4.2.4 Punto de ignición y llama

En el ensayo de punto de ignición y llama se comenzó a una temperatura del ligante de 80° C . Para el ligante asfáltico original de penetración 80/100 se obtuvo una temperatura de ignición de 294° C como temperatura de ignición y una temperatura de llama de 304° C .

4.2.5 Punto de ablandamiento

El ensayo de punto de ablandamiento se realizó bajo las mismas condiciones descritas en la sección 4.1.5. En ningún momento se repitió el ensayo por encontrarse una diferencia en la temperatura del momento de caída de las dos esferas menor a 1° C , mostramos los resultados en la Figura 26.

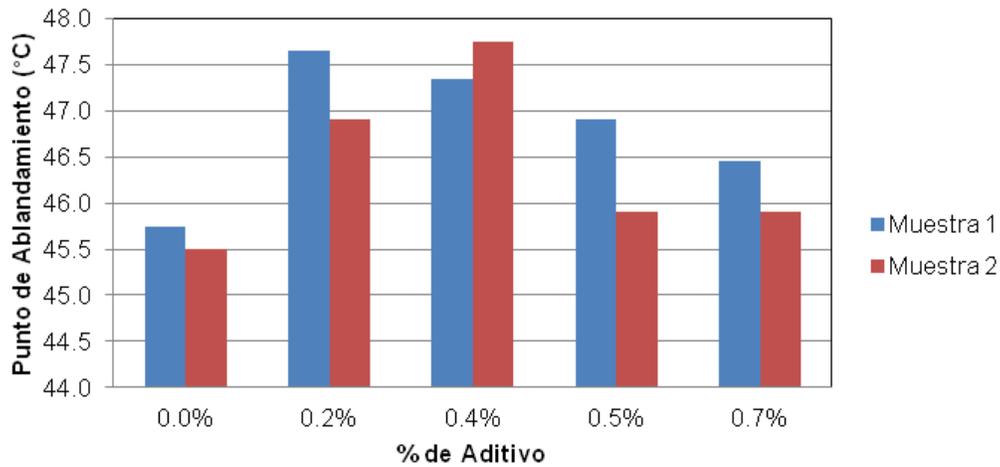


Figura 26. Punto de Ablandamiento Ligante de Penetración 80/100

El ligante esta cumpliendo las normas INVIAS, se puede decir que el ligante tiene propiedades de consistencia, las cuales ayudan para ser usados como impermeabilizantes. En la Figura 27 se presenta la comparación del punto de ablandamiento para los diferentes porcentajes de aditivo

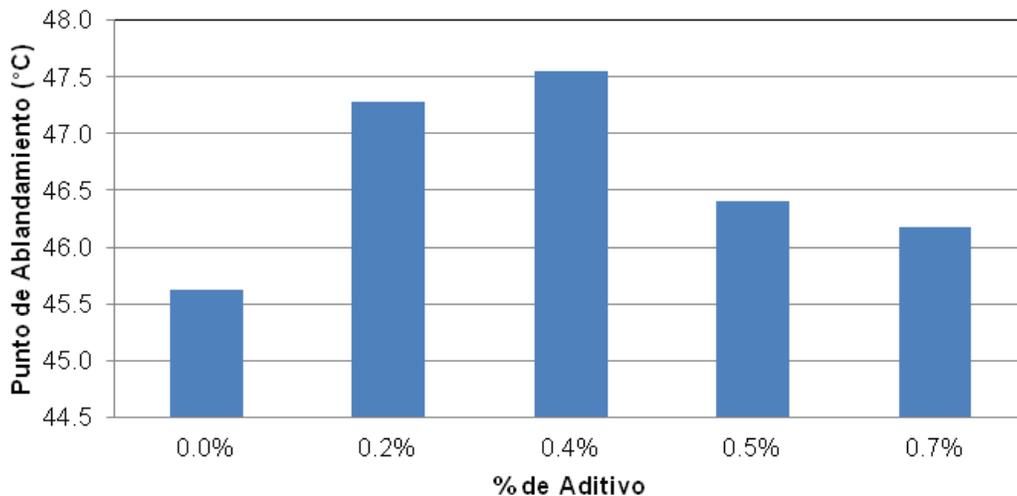


Figura 27. Punto de Ablandamiento de promedio de muestras Ligante de Penetración 80/100

4.2.6 Índice de Penetración

Con el punto de ablandamiento y las penetraciones obtenidas anteriormente podemos sacar el Índice de Penetración (I_p) como se mostró en la Ecuación 8 de la sección anterior. Con la ecuación y los resultados mostrados anteriormente obtenemos el I_p presentado en la Tabla 18.

Tabla 15. Índice de Penetración de Ligante 80/100

Porcentaje (Aditivo)	Promedio Penetraciones	Promedio Punto de Ablandamiento	I_p
0.0%	83	45.6°C	-1.15
0.2%	84	47.3°C	-0.62
0.4%	83	47.6°C	-0.58
0.5%	102	46.4°C	-0.30
0.7%	94	46.2°C	-0.62

Según los resultados de la Tabla 18., el ligante sin modificar al tener I_p menor a -1 es un cemento asfáltico con mayor susceptibilidad a la temperatura, rico en resina y presenta un comportamiento viscoso; los ligantes con porcentaje de aditivo, 0.2%, 0.4%, 0.5% y 0.7% presentan un I_p entre +1 y -1 quiere decir que presentan mediana susceptibilidad a la temperatura y tienen comportamiento entre viscoso y elástico, siendo este grupo la mayoría de cementos asfálticos utilizados en la construcción de carreteras.

4.2.7 Viscosidad Rotacional

El ensayo de viscosidad rotacional se realizó al ligante 80/100 modificado con los cuatro porcentajes de aditivo, y al ligante sin modificar. El comportamiento de la curva reológica presento las mismas características mencionadas para la curva reológica del ligante con penetración 60/70 (ver numeral 4.1.7).

Es oportuno aclarar que estos ensayos de viscosidad se realizaron en los laboratorios de la planta de Shell Mosquera; por lo que, a modo de verificación, para este ligante de penetración 80/100 se decidió realizar el mismo ensayo en los laboratorios de la Universidad Javeriana, y al ligante modificado con 0.4% de aditivo.

A continuación se presenta, en la Figura 28, las curvas reológicas de los ligantes con penetración 80/100 sin modificar y modificado con diferentes porcentajes de CECABASE RT[®] ensayados en los laboratorios de Shell Mosquera y en el laboratorio de la Universidad Javeriana (solo el modificado con 0.4% de aditivo).

Como resultado entre la comparación de los ensayos realizados en los dos laboratorios, se concluye estos son muy similares, ya que las curvas presentan solo una variación muy leve; por lo tanto se puede decir que se presenta reproducibilidad en los resultados.

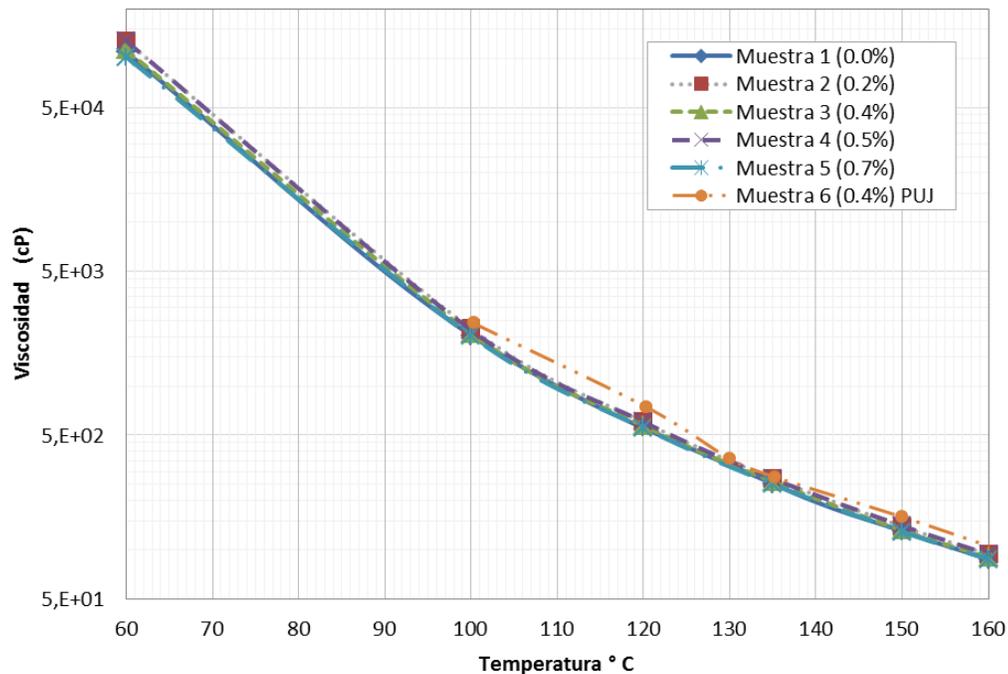


Figura 28. Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 80/100 realizados en Shell y PUJ

Debido a la similitud entre la viscosidad original y la modificada con CECABASE RT[®], se realizó la comparación de la viscosidad de los cinco ligantes a una temperatura de 135° C. Se escogió esta temperatura ya que es la utilizada por Superpave para la determinación del Grado de desempeño del ligante, ya que es esta la temperatura adecuada para su manipulación en planta. En la Figura 29 se presenta la relación entre la viscosidad a 135° C y el porcentaje de aditivo; en esta figura se observa que la viscosidad se incrementa al adicionar el aditivo al ligante, y que en el ligante modificado con 0.4% y 0.7% la viscosidad baja respecto a lo obtenido para contenidos de 0.2% y 0.5%.

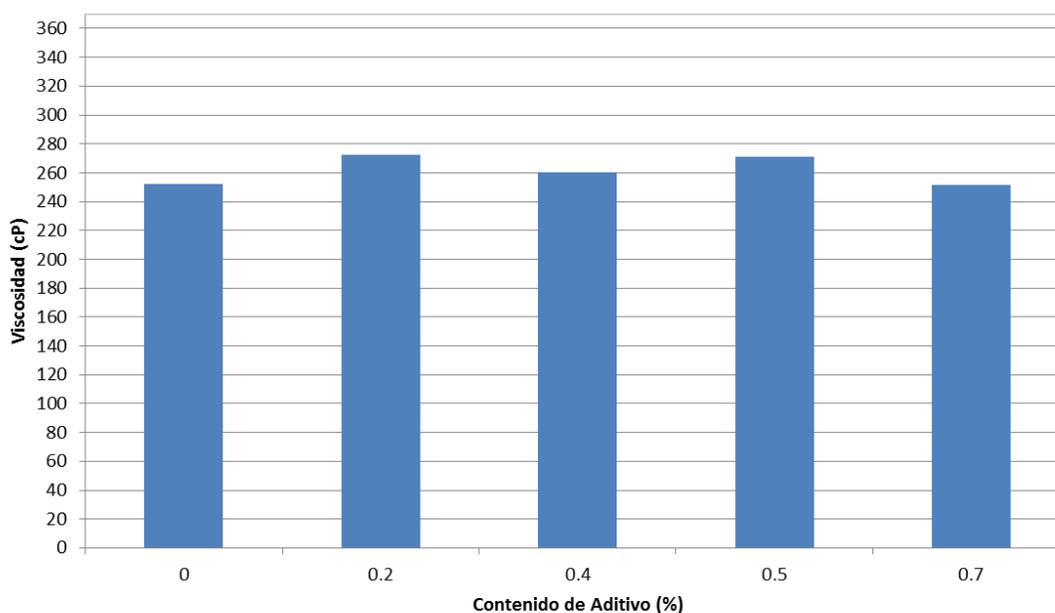


Figura 29. Viscosidad rotacional de ligantes modificados penetración 80/100 con Temperatura constante cambiando el porcentaje de Aditivo CECABASE RT[®]

4.2.8 Estabilidad al Almacenamiento

Se fabricaron dos muestras para el ensayo de estabilidad al almacenamiento, estas se realizaron con un porcentaje de aditivo de 0.4%, manteniéndolas durante

5 días a una temperatura constante de 164° C. A estas muestras se les realizaron los ensayos de ablandamiento y penetración; estos resultados se presentan en la Tabla 16 y la Tabla 17.

Tabla 16 Diferencia en el ensayo punto de ablandamiento

Lectura	Punto de Ablandamiento	
	Superior	Inferior
1	47.2°C	46.8°C
2	47.0°C	46.6°C
Promedio:	84	82
ΔT	0.4° C	

Tabla 17 Diferencia en el ensayo de penetración

Lectura	Penetración	
	Superior	Inferior
1	83.3	82.8
2	84.5	82.6
3	83.4	81.5
Promedio:	84	82
ΔP	1.4 (0.1 mm)	

En los anteriores resultados se observa que las variaciones entre la muestra del tercio superior y el inferior son mínimas. En cuanto a la diferencia en el punto de ablandamiento (Tabla 16), este valor fue de 0.4° C, el cual es inferior a 5° C, valor especificado por el INVIAS en la Tabla 400.4 del Artículo INV 400-07 para este ensayo; por lo cual se concluye que el ligante asfáltico modificado con 0.4% de CECABASE RT[®] no presentara fenómenos de cremado o sedimentación durante su almacenamiento a temperaturas elevadas. En cuanto a los resultados del ensayo de penetración, el artículo INV 400-07 no especifica algún valor de decisión; de este resultado se concluye que la diferencia la diferencia de 1.4 décimas de milímetro (Tabla 17) es despreciable, lo que indica que es poco factible la separación del ligante y el aditivo.

Estos resultados manifiestan otra ventaja en el uso de CECABASE RT[®] para la producción de mezclas asfálticas tibias.

4.2.9 DSR

El ensayo de DSR mide las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos haciendo uso del Reómetro de Corte Dinámico. Este ensayo se realizó al ligante 80/100 sin modificar y al modificado con 0.4% de CECABASE RT[®]. Los resultados de este ensayo se presentan en la Figura 30, donde se observa que el aditivo no modificó las propiedades del cemento asfáltico.

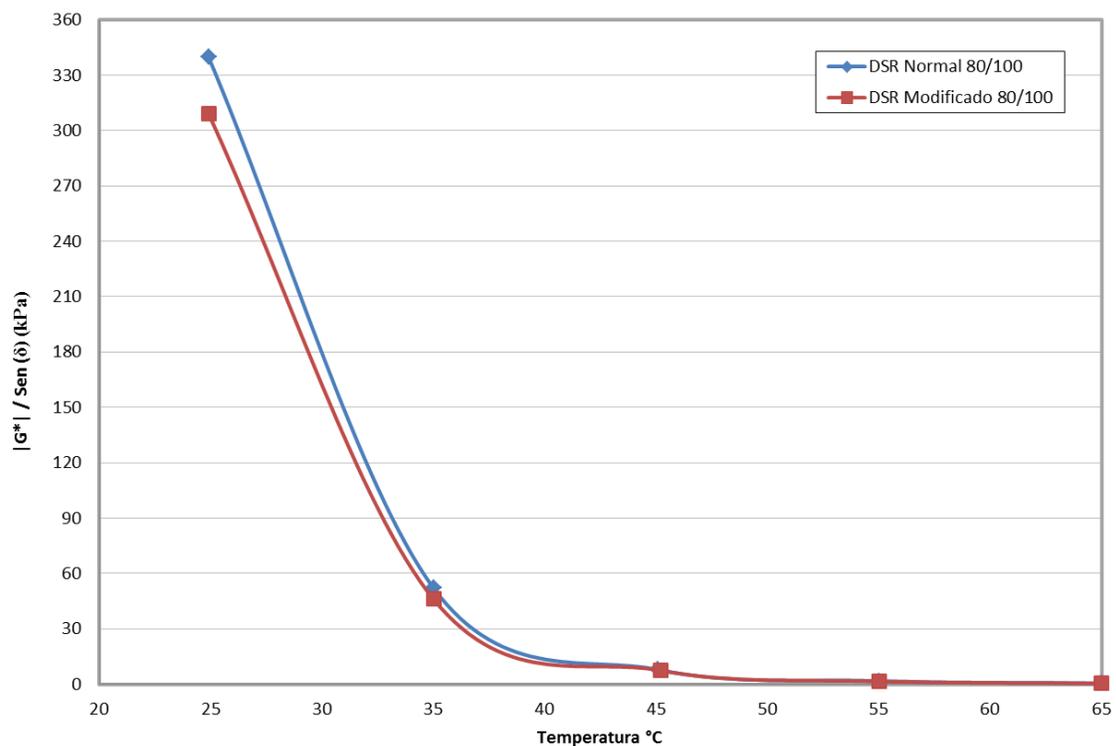


Figura 30. Ensayo DSR con Reómetro de Corte Directo ligante 80/100 sin modificar y con aditivo CECABASE RT[®] al 0.4%

En la Figura 30 se evaluó la contribución de la resistencia a las deformaciones plásticas en la mezcla con base en la medición del parámetro reológico $G^*/\sin(\delta)$ para las diferentes temperaturas ensayadas, y se encontró que el aditivo y el ligante tienen un comportamiento homogéneo.

4.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL CON MAYORES PORCENTAJES DE ADITIVO

Para confirmar que este tipo de aditivo no modifica sustancialmente la viscosidad del ligante, se procedió a ampliar la investigación del intervalo de los contenidos de aditivo hasta 5% sobre el peso del ligante. Es así como los porcentajes de CECABASE RT[®] se ensayaron a 1%, 2%, 3%, 4% y 5%. Es oportuno aclarar que estos porcentajes están por encima del porcentaje óptimo encontrado en la literatura; porcentajes tan altos como estos incrementan el costo de producción de la mezcla asfáltica. En la Figura 31 se presenta los resultados utilizando el ligante de penetración 80/100.

Tal como se realizó con los porcentajes de aditivo menor al 1%, en este caso también se hizo una comparación de la viscosidad de los cinco ligantes modificados a una temperatura de 135° C. En la Figura 32 se presenta la relación entre la viscosidad a 135° C y el porcentaje de aditivo; en esta figura se observa que la viscosidad disminuye al aumentar el contenido de aditivo al ligante, resultado diferente a lo que se apreció con porcentajes menores a 1% de aditivo.

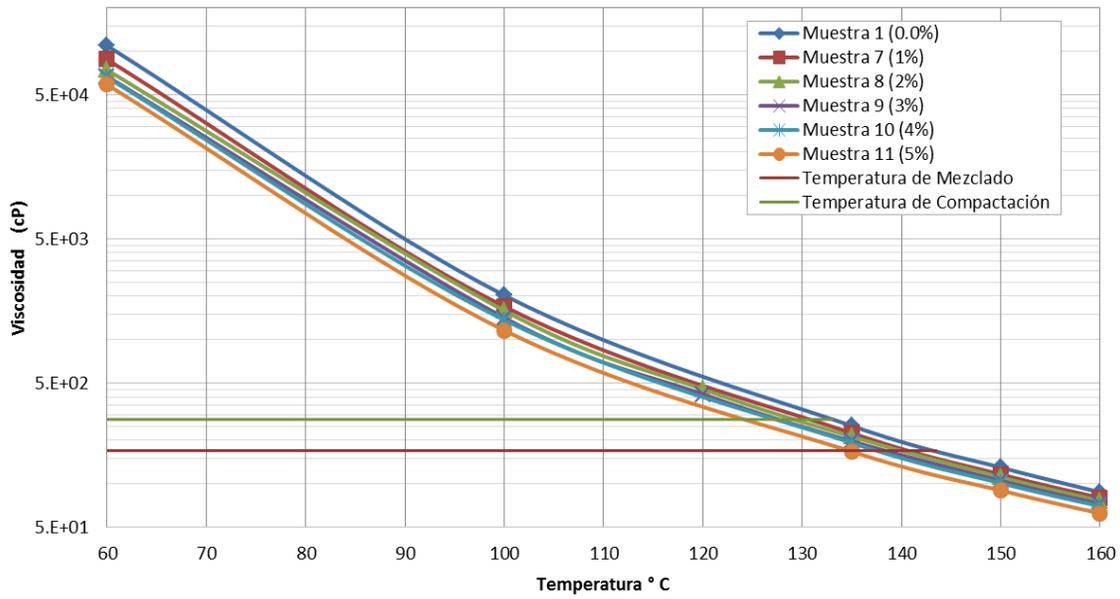


Figura 31 Viscosidad Rotacional de Ligantes Modificados penetración 80/100 realizados con mayores porcentajes de aditivo (1% al 5%)

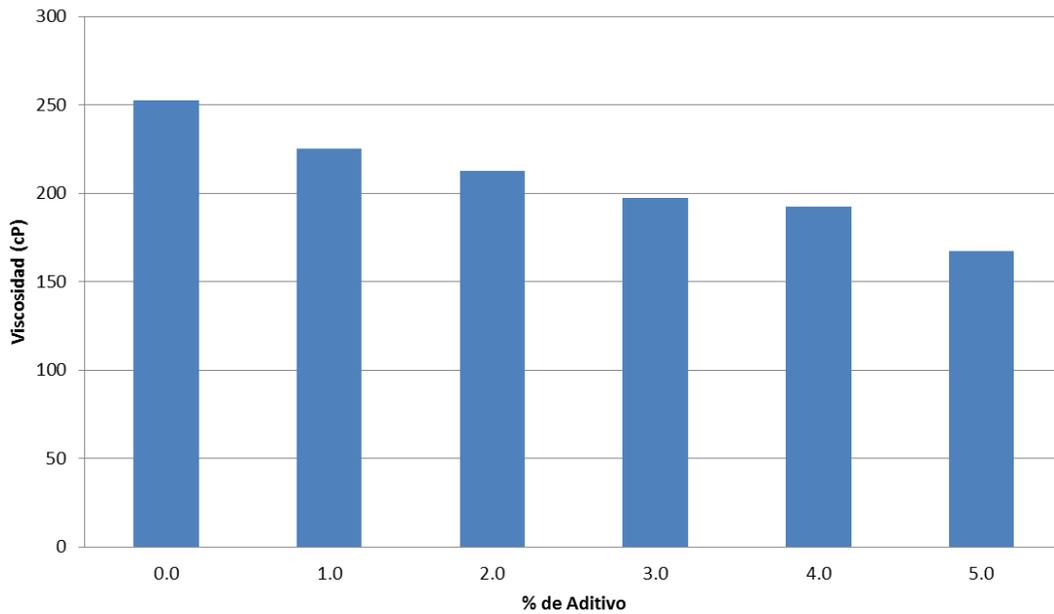


Figura 32 Viscosidad Rotacional a temperatura constante de 135° C de Ligantes con penetración 80/100 con mayor porcentaje de Aditivo CECABASE RT®

A partir de estos resultados, se determinaron las temperaturas de compactación y mezclado para estos cinco porcentajes de aditivo. Para esto, se determinó la temperatura de mezclado para una viscosidad de 170 cP (promedio entre 150 cP y 190 cP), y la la temperatura de compactación para una viscosidad de 280 cP (promedio entre 250 cP y 310 cP); estas temperaturas se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18 Temperatura de Mezcla y Compactación con mayores porcentajes de Aditivo

Muestra	% Aditivo	Temperatura de Mezclado (°C)	Temperatura de Compactación (°C)
Muestra 1	0	144	133
Muestra 6	1	141.5	131
Muestra 7	2	140	130
Muestra 8	3	138.5	128
Muestra 9	4	138	128
Muestra 10	5	134.5	125.5

En este caso se puede observar que con un porcentaje de aditivo de 5% se obtienen temperatura de mezclado de 134.5° C, y de compactación de 125.5° C; lo cual representa una disminución aproximadamente de 10° C en el mezclado y 8° C en la compactación. Con el fin de analizar la viabilidad económica del uso del aditivo en grandes proporciones respecto al ligante asfáltico, en la Tabla 19 se presenta un análisis de viabilidad económica de los diferentes porcentajes respecto al porcentaje de aditivo de 0.4%; para este análisis se consideró un precio del aditivo de \$15,000/kg. Como se observa en Tabla 19, el inconveniente de utilizar porcentajes de aditivo mayores al 1%, es el incremento en el costo del aditivo CECABASE RT®

Tabla 19 Viabilidad económica según el porcentaje de CECABASE RT[®] en 1 Tonelada de Ligante asfáltico

% Cecabase RT[®]	Peso de Cecabase RT[®] en 1 T	Precio	incremento en el costo¹
0.4%	4.0 kg	\$ 60,300	0%
0.5%	5.0 kg	\$ 75,450	25%
0.7%	7.1 kg	\$ 105,750	75%
1.0%	10.1 kg	\$ 151,500	151%
2.0%	20.4 kg	\$ 306,000	407%
3.0%	30.9 kg	\$ 463,950	669%
4.0%	41.7 kg	\$ 625,050	937%
5.0%	52.6 kg	\$ 789,450	1209%

¹ Análisis respecto al costo con 0.4% de aditivo.

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS SOBRE LA CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE MODIFICADO

A partir de los resultados anteriores, donde se observa que el aditivo químico utilizado no presentó modificaciones considerables sobre el ligante al ser combinado en bajas proporciones, se decidió investigar su comportamiento en la mezcla asfáltica.

Para esto se elaboró una mezcla asfáltica con un porcentaje de aditivo de 0.4% respecto al peso del ligante. Este porcentaje se escogió debido a que se reporta como óptimo en los estudios realizados en Estados Unidos y Europa por la empresa Arkema Inc. Para la mezcla asfáltica se utilizó el diseño obtenido por el ingeniero Jonathan Vera Silva, en su tesis de grado titulada “Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión”; ya que el agregado pétreo y el ligante utilizado en estas dos investigaciones provenían de la misma fuente.

Cabe aclarar que este análisis se realizó a modo de verificación, ya que no hacía parte de los objetivos del proyecto y tampoco se tenía el tiempo necesario para determinar el diseño óptimo de la mezcla y el contenido óptimo del aditivo.

4.5 RESULTADOS DE ENSAYOS REALIZADOS EN LA MEZCLA ASFÁLTICA

4.5.1 Selección de Materiales

La selección de los materiales que harán parte de la mezcla asfáltica deberán cumplir con propiedades volumétricas adecuadas para las condiciones de tránsito y del medio ambiente relacionadas al proyecto, El nivel que se seleccionó para el diseño de la mezcla fue el Primer Nivel, para mezclas con tamaño máximo de 19 mm y tamaño máximo nominal de 12.5 mm, para la selección de los materiales se tomaron los resultados obtenidos en la tesis del ingeniero Jonathan Vera Silva, en el trabajo de grado titulado “Caracterización de mezclas asfálticas por su resistencia a fatiga por reflexión”, teniendo en cuenta que para la realización de las dos investigaciones el agregado pétreo y el ligante proviene de la misma fuente.

4.5.1.1 Selección del Agregado

Los Agregados suministrados por el ingeniero Vera cumplen con las especificaciones del artículo INV 400-07, en la sección 400.2.1, Agregados pétreos y llenante mineral, Vera les realizó ensayos de caracterización, sus resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20 Ensayos del agregado pétreo.

Fuente: Vera, 2012

Características del Ensayo	Unidad	Norma INV	Especificaciones INVIAS		Resultados
			Min.	Max.	
Gravedad Específica del llenante mineral	-	E-128-07	-	-	2.73
Equivalente de arena	%	E-133-07	50	-	58
desgaste de los Ángeles	%	E-218-07	-	25	28.6
Perdida en ensayo de solidez Sulfato de magnesio	%	E-220-07	-	18	4.1
Gravedad específica y absorción de agregado fino	-	E-222-07	-	-	2.48/1.7
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	-	E-223-07	-	-	2.59/1.6
Partículas fracturadas mecánicamente	%	E-227-07	85	-	87.7
Índice de alargamiento y aplanamiento	%	E-230-07	-	35 ⁽¹⁾	21.1
Valor de azul de metileno	%	E-235-07	-	10 ⁽¹⁾	4.8
Desgaste Micro-Deval	%	E-238-07	-	20	10.4
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	%	E-240-07	-	10	1.4

(1) Valores especificados para bases y subbases granulares.

La granulometría utilizada por el Ingeniero Vera cumplió con el criterio del Instituto Nacional de Vías INVIAS para mezclas asfálticas tipo MDC-2, logrando una gradación cerrada y cercana a la línea de máxima densidad, y distante de los límites de los tamices de control o de zona restringida, tal como se muestra en la Figura 33.

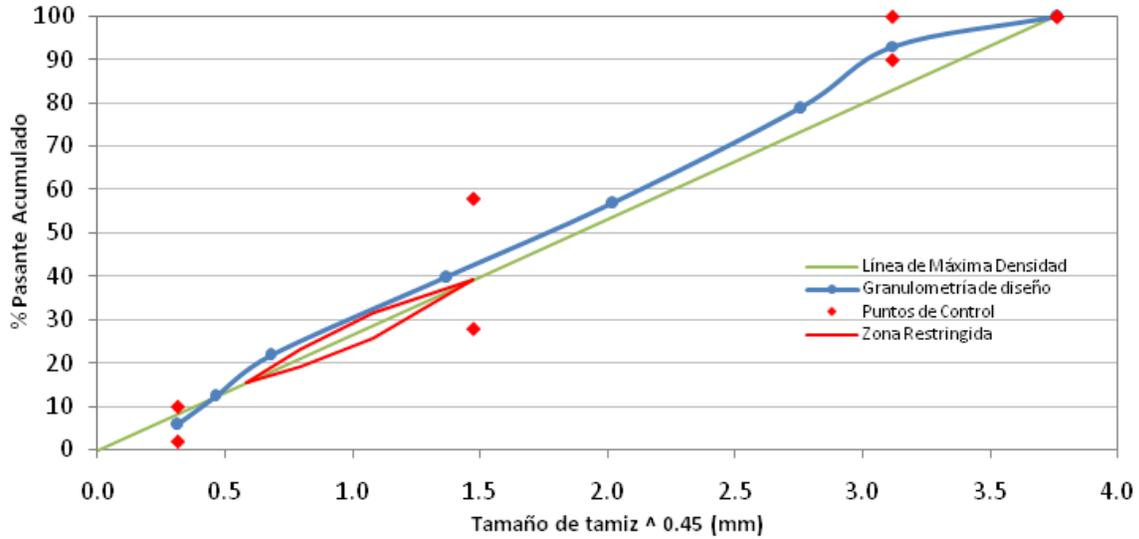


Figura 33 Granulometría de la mezcla Asfáltica

Fuente: Vera, 2012

Los ensayos de caracterización de los agregados cumplieron con la metodología Superpave. Estos resultados se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21 Propiedades de los agregados pétreos

Fuente. Vera, 2012

Propiedad	Criterio	Mezcla
Partículas alargadas y aplanadas	10% máx.	1.4%
Equivalente de arena	50% mín.	58.0%
Desgaste de Los Ángeles	35% máx.	28.6%
Intemperismo acelerado	10% máx.	4.1%
Gravedad específica Bulk (G_{sb})	-	2.538
Gravedad específica aparente (G_{sa})	-	2.647

4.5.1.2 Selección del contenido de ligante

El contenido de ligante asfáltico a mezclarse se varió en la mezcla para obtener sus propiedades volumétricas y de compactación que satisficiera los criterios de diseño de la mezcla asfáltica especificados por Superpave. Para esto se estimó el

peso específico de la mezcla y se emplearon los cálculos que se encuentran en el ANEXO C-3 de este documento. El número de giros se determinó con la Tabla 8, teniendo en cuenta que la temperatura promedio de Bogotá es aproximadamente 15° C, y se tomó como el nivel de tránsito el penúltimo intervalo; con lo anterior se obtuvo un número de giros inicial de 9, de diseño de 126, y un número de giros máximo de 204. De esta forma se determinó el porcentaje inicial de ligante, con los valores presentados en la Tabla 22 (Vera J., 2012).

Tabla 22 Porcentaje inicial de ligante asfáltico

Fuente. Vera, 2012.

PARÁMETROS	MEZCLA
Gravedad específica Bulk de la mezcla, G_{sb}	2,538
Gravedad específica aparente de la mezcla, G_{sa}	2,647
Porcentaje de agregado en la mezcla, P_s (%)	0,950
Volumen de vacíos de aire, V_a (cm ³ /cm ³)	0,040
Porcentaje de ligante en la mezcla, P_b (%)	0,050
Gravedad específica del ligante, G_b	1,007
Tamaño del tamiz máximo nominal, S_n (pulg)	0,500
Gravedad específica efectiva de la mezcla, G_{se}	2,625
Volumen absorbido del ligante, V_{ba} (cm ³ /cm ³)	0,029
Volumen del ligante efectivo, V_{be} (cm ³ /cm ³)	0,101
Peso del agregado en la mezcla, W_s (g)	2,216
Porcentaje inicial del ligante, P_{bi} (%)	5,6

Con el porcentaje de ligante inicial de 5.6%, se compactaron en el Compactador Giratorio dos especímenes para la mezcla de diseño, y se determinaron las propiedades volumétricas y de compactación, tal como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23 Propiedades Volumétricas y de Compactación

Fuente. Vera, 2012

PARÁMETROS	MEZCLA	MEZCLA
	No. 1	No. 2
Vacíos de aire en la mezcla, V_a (%)	4,2	4,2
Vacíos del agregado mineral, V_{ma} (%)	14,1	14,1
Vacíos llenos de asfalto, V_{fa} (%)	70,2	69,9
Compactación inicial, %G _{mm} a N _{ini} (%)	89,2	89,2
Compactación máxima, %G _{mm} a N _{máx} (%)	96,8	96,8

Teniendo en cuenta que para realizar un diseño de mezcla con la metodología Superpave se debe utilizar un porcentaje de ligante que permita alcanzar un 4% de vacíos de aire, caso que no sucedió con este porcentaje inicial de ligante, el ing. Vera recalculó con la siguiente fórmula empírica, con la que se obtuvo un porcentaje de ligante de 5.7%.

$$P_{b,estimado} = P_{bi} - [0.4(4 - V_a)]$$

Ecuación 9

Tabla 24 Resumen propiedades volumétricas y de compactación con 5.7% de ligante

Fuente. Vera, 2012

PARÁMETROS	MEZCLA
Porcentaje de ligante estimado, P_b (%)	5.7
Compactación inicial, %G _{mm} a N _{ini}	89.6
Compactación, %G _{mm} a N _{dis}	96.0
Compactación máxima, %G _{mm} a N _{máx}	97.0
Vacíos de aire en la mezcla, V_a (%)	4.0
Vacíos del agregado mineral, VMA (%)	14.1
Vacíos llenos de asfalto, VFA (%)	71.5
Contenido del ligante efectivo, $P_{be,estimado}$ (%)	5.0
Proporción de polvo (llenante mineral), DP	1.2

Con los cálculos realizados anteriormente se tienen valores aceptables de VAM, VFA, proporción de llenante mineral, y criterio de densificación para $N_{\text{máximo}}$, por lo que se acepta el diseño de la mezcla (Vera J., 2012).

En el Primer Nivel de Superpave se exige ensayar por lo menos cuatro contenidos de ligante; en ese caso se compactaron dos especímenes por contenido de ligante, utilizando los valores de densificación para N_{inicial} (9 giros), $N_{\text{diseño}}$ (126 giros) y $N_{\text{máximo}}$ (204 giros), los contenidos de ligante elegidos fueron: 5.2%, 5.7%, 6.2% y 6.7%.

Tabla 25 Resumen propiedades volumétricas y de compactación

Fuente: Vera, 2012

Propiedades	Porcentaje de asfalto			
	5.2%	5.7%	6.2%	6.7%
%Gmm @ N=9	87.7	89.6	90.4	92.0
%Gmm @ N=126	93.9	95.9	97.2	98.3
%Gmm @ N=204	94.8	97.0	98.1	98.9
% de vacíos de aire	6.1	4.1	2.8	1.7
% VMA	14.1	14.2	13.9	13.9
%VFA	57.0	71.6	80.0	87.6

Para lograr un contenido de aire de 4%, el contenido de ligante asfáltico correspondiente deberá ser de 5.7%. Para este contenido se verificó que cumpliera con las propiedades volumétricas de la mezcla.

4.5.2 Compactación Giratorio Superpave

Con el diseño de mezcla obtenido por el Ingeniero Vera, y expuesto en la sección anterior, se analizaron tres condiciones de prueba, para lo cual se elaboraron 18 probetas, de las cuales seis se compactaron a una temperatura de 140° C (HMA), las siguientes seis se compactaron a una temperatura de 110° C (sin aditivo WMA*), y las seis restantes se compactaron con aditivo a una temperatura de 110° C (WMA). Lo anterior con el fin de realizar el ensayo de tensión indirecta a cada una de las tres mezclas (HMA, WMA*, WMA), y comparar los resultados obtenidos para determinar el desempeño de la mezclas asfáltica tibia con aditivo CECABASE RT[®].

Tabla 26 Número de Probetas realizadas

Mezcla	Número de Probetas
Sin aditivo a la Temperatura caliente (140° C)	6
Sin aditivo a la Temperatura tibia (110° C)	6
Con aditivo a la Temperatura tibia (110° C)	6
Total	18

Según la literatura revisada, la reducción en la temperatura de producción de las mezclas asfálticas tibias se ve reflejada en la temperatura de los agregados que se calientan con una diferencia de 30° C, como se reporta en la Tabla 27; aunque mantener la temperatura de los materiales es complicado, siempre se debe tener mayor cuidado para cumplir con estas especificaciones.

Tabla 27 Temperaturas para la realización de briquetas

Tipo de Mezcla	Temperatura del Ligante (°C)	Temperatura del Agregado (°C)	Temperatura de Mezcla (°C)	Temperatura de Compactación (°C)
HMA	160	150	160	140
WMA (Sin Aditivo)	160	120	130	110
WMA (Con 0.4% CECABASE RT®)	160	120	130	110

4.5.3 Prueba de Tracción Indirecta TSR

Para realizar el ensayo de tracción indirecta se siguió la norma de ensayo INV-725-07, en la cual se compactaron seis (6) probetas de prueba, dos (2) para cada condición. Con los agregados de diseño y con el porcentaje de ligante de diseño (5.7%) se espera obtener vacíos de aire de $7\pm 1\%$ variando la altura de compactación en el Compactador Giratorio. Esta altura se obtuvo de un proceso iterativo en el cual la densidad geométrica se igualó a la densidad específica objetivo, las alturas obtenidas son la que aparecen en la Tabla 28.

Tabla 28 Alturas de las briquetas para obtener $7\pm 1\%$ de vacíos

Tipo de Mezcla	Altura iterada de la briketa (cm)
HMA	7.25
WMA (Sin Aditivo)	7.23
WMA (Con 0.4% CECABASE RT®)	7.51

Tomando como referencia estas alturas iniciales, se procedió a compactar las briquetas en el Compactador Giratorio y determinar posteriormente el porcentaje de vacíos con la Ecuación 6; con esto se verificó el cumplimiento de la norma de ensayo en que los vacíos deberían ser $7\pm 1\%$. Con este resultado se continuó con la fabricación de las 18 probetas con las alturas obtenidas, de las cuales nueve (9)

fueron consideradas como especímenes de control, y la otra mitad fue sometida a saturación por un ciclo de inmersión en agua a 60° C durante 24 horas.

En el ANEXO D, ANEXO E y ANEXO F se presentan detalladamente los cálculos de compactación de las briquetas y del ajuste de las alturas para el ensayo TSR.

4.5.3.1 Mezcla asfáltica caliente

Los resultados obtenidos del ensayo TSR sobre la mezcla asfáltica en caliente HMA se muestran en la Figura 34 muestra los resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad al agua utilizando la prueba de Tracción Indirecta. En estos resultados se tiene una relación promedio de resistencia a la tracción de 86%, cumpliendo con el valor mínimo requerido en las especificaciones del INVIAS en el Artículo 450-07.

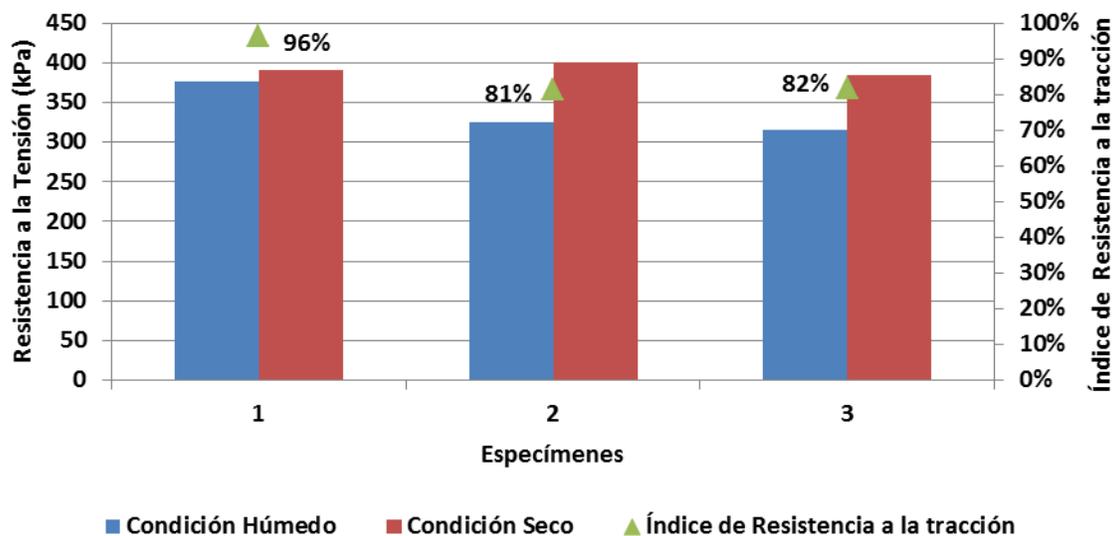


Figura 34 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica caliente HMA

4.5.3.2 Mezcla asfáltica tibia sin aditivo

Los resultados obtenidos del ensayo TSR sobre la mezcla asfáltica tibia sin aditivo (WMA*) se muestran en la Figura 35 muestra los resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad al agua utilizando la prueba de Tracción Indirecta. En estos resultados se tiene una relación promedio de resistencia a la tracción de 74%, la cual no cumple con el valor mínimo requerido en las especificaciones del INVIAS en el Artículo 450-07.

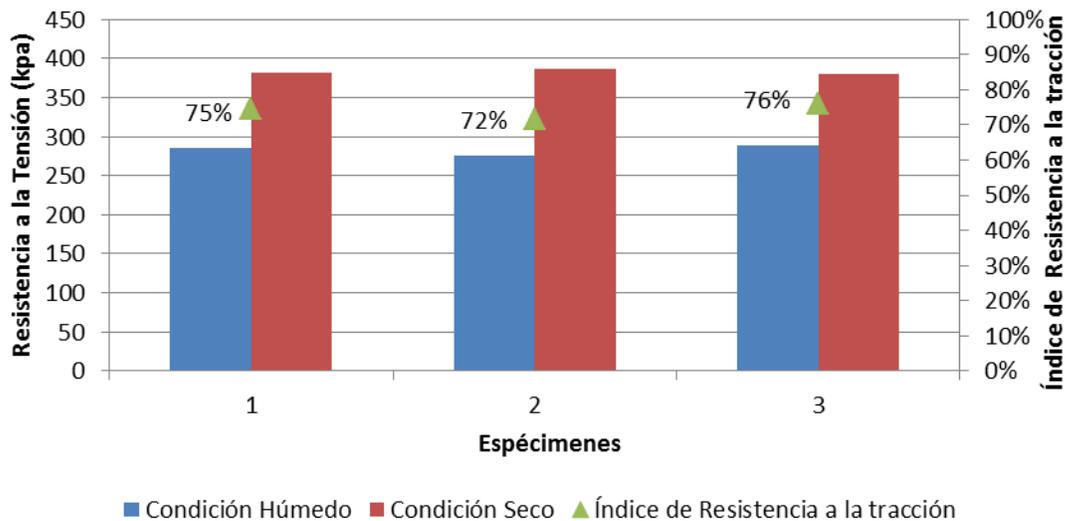


Figura 35 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica tibia sin aditivo WMA*

4.5.3.3 Mezcla asfáltica tibia con 0.4% de CECABASE RT[®]

Los resultados obtenidos del ensayo TSR sobre la mezcla asfáltica tibia con 0.4% de CECABASE RT[®] (WMA) se muestran en la Figura 35 muestra los resultados obtenidos del ensayo de susceptibilidad al agua utilizando la prueba de Tracción Indirecta. En estos resultados se tiene una relación promedio de resistencia a la tracción de 87%, cumpliendo con el valor mínimo requerido en las especificaciones del INVIAS en el Artículo 450-07.

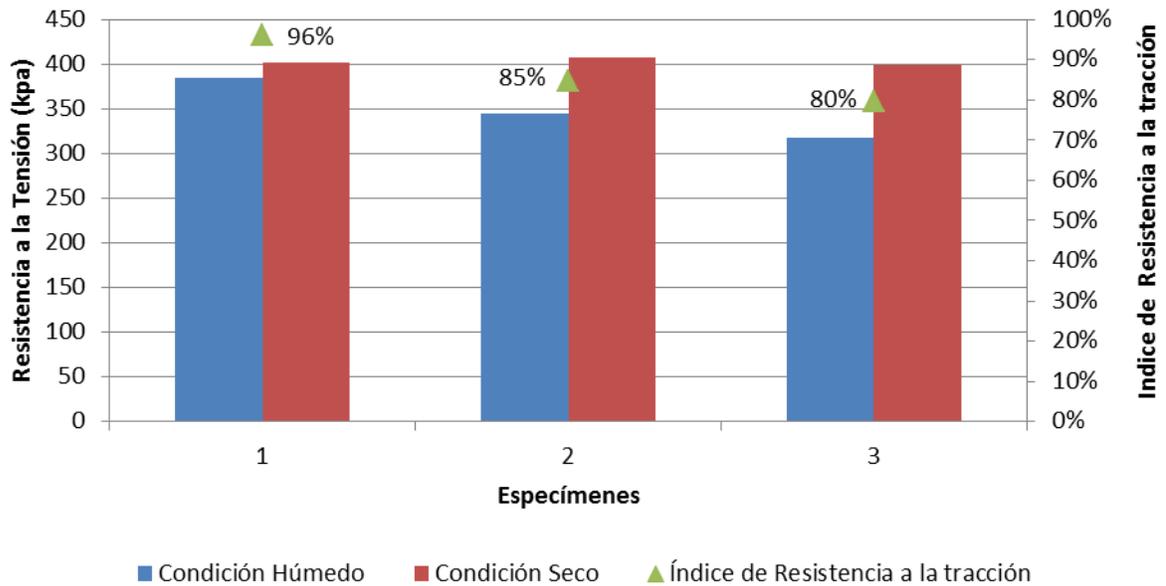


Figura 36 Resultados de TSR sobre la mezcla asfáltica tibia con aditivo WMA

4.5.3.4 Comparación de resultados de TSR

La comparación de los resultados obtenidos del ensayo TSR sobre las tres condiciones de mezcla se presentan en la Tabla 29, se puede observar el resultado obtenido con el ensayo de susceptibilidad a la humedad con tracción indirecta, en el cual el comportamiento de la mezcla asfáltica tibia modificada con el aditivo CECABASE RT[®] (WMA) tiene un desempeño igual al de la mezcla asfáltica caliente (HMA).

Tabla 29 Resumen de resultados de ensayos para los tres tipos de mezclas

Tipo de Mezcla	GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA, Gmm	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK, Gmb	Susceptibilidad a la humedad (kPa)		Resistencia a la Tracción Indirecta
			Sin acondicionar	Acondicionado	
HMA	2.406	2.240	392	338.7	86%
WMA (Sin Aditivo)	2.409	2.227	383	283	74%
WMA (Con 0.4% CECABASE RT®)	2.318	2.155	402.7	349.3	87%

Aunque en este trabajo de grado se realizaron ensayos de tracción indirecta para poder caracterizar las mezclas tibias modificadas con CECABASE RT[®], no se han registrado ensayos de laboratorio estándares capaces de evaluar la trabajabilidad de las mezclas, por lo que solo se pueden observar estas diferencias en campo. Aunque muchos ensayos se han realizado alrededor del mundo para poder descifrar este comportamiento, ninguno de estos métodos ha sido completamente representativo de lo que se observa a escala real (J. González-León P.C., V. Luca, 2011).

5 DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados de Gonzalez-León (2011), ingeniero y miembro de Arkema Group encargado de la investigación y desarrollo del aditivo CECABASE RT[®], obtenidos sobre un ligante de penetración 35/50 1/10mm modificado con 0.3% de aditivo, encontró que no se presenta diferencia entre las curvas de viscosidad del ligante modificado y el original. Con el mismo ligante modificado encontró que la temperatura vs. $(G^*/\sin \delta)$, al igual que la viscosidad, no presentaba ninguna diferencia. Estos resultados están acorde con lo obtenido en esta investigación, donde no se encontraron cambios en las propiedades reológicas del asfalto. De igual forma, en el estudio elaborado por la Universidad de Iowa denominado “Evaluation of selected warm mix asphalt additives”, en el que se ponen a prueba los cuatro aditivos mas usados en la industria para la elaboración de mezclas asfálticas tibias, se encontró que CECABASE RT[®] ha probado su efectividad en ensayos de campo, donde se han obtenido reducciones en la temperatura de producción de la mezcla asfáltica de hasta de 27° C, reducción comparada con la temperatura típica de una mezcla asfáltica en caliente. Entre los cuatro productos usados en este estudio, reportan que CECABASE RT[®] es uno de los productos para producción de mezclas asfálticas tibias que genera mayor reducción en las temperaturas de mezclado y compactación.

Para poner un ejemplo, en Latinoamérica, específicamente en Argentina, se realizó un ensayo de campo en el año 2008 por Vetek, utilizando un ligante de penetración 35/50 y con 0.5% de CECABASE RT[®]. En este ensayo se utilizaron temperaturas de producción, colocación y compactación de 130° C, 120° C, y 100° C, respectivamente. Estas mezclas no registraron problemas de trabajabilidad, y si

se observaron numerosas ventajas como el incremento de la producción hasta en un 20%.

Por otro lado estudios realizados por CECA Arkema Group, realizó ensayos de susceptibilidad a la humedad para comparar la resistencia de mezclas asfálticas calientes y una mezclas asfálticas tibias modificadas con 0.4% de aditivo CECABASE RT[®] dando valores de 87% para una mezcla caliente y de 82% para una tibia (Hajj E.Y., Ph.D. y Cortez E.M., 2011), resultados similares a los obtenidos en este trabajo de grado.

6 CONCLUSIONES

Al caracterizar los cementos asfálticos con penetración 60/70 y 80/100, adicionándole el aditivo CECABASE RT[®], se pudo observar que las características físicas del ligante se mantienen cumpliendo las especificaciones INVIAS, por esta razón no se pudo encontrar el contenido óptimo de aditivo y los autores se basaron en la literatura para escoger al 0.4% de aditivo como un porcentaje óptimo y realizar ensayos para mezclas asfálticas.

Se realizó una mezcla asfáltica MDC-2 y otra adicionándole CECABASE RT[®], donde en la producción de estas mezclas se observó que la modificada con el aditivo tuvo una disminución de temperatura de 30° C en los agregados, y sin embargo mantiene el mismo comportamiento de la MDC-2 en el ensayo de tensión indirecta y susceptibilidad a la humedad.

Esta investigación, concluye que el aditivo CECABASE RT[®] no modifica ninguna propiedad del ligante y la reducción de temperatura en la mezcla se realiza en los agregados, esto significa que el aditivo tiene beneficios ambientales, que permite a una baja temperatura brindar las mismas propiedades físicas y mecánicas de una mezcla MDC-2, disminuyendo emisiones de gases, consumo de energía y combustible.

7 RECOMENDACIONES

- Se recomienda tomar distintos porcentajes de aditivo CECABASE RT[®] para realizar mezclas asfálticas tibias, y a partir de ensayos establecer el contenido óptimo. Esto servirá también para comprobar que la disminución en temperaturas se observará en los agregados y no en la curva reológica, como se reporta en la literatura.
- En Colombia, es necesario implementar nuevas especificaciones para el uso de Ligantes modificados con aditivos para la producción de mezclas asfálticas tibias, pues en la actual normativa solo se describen procedimientos para mezclas asfálticas calientes o modificadas con polímeros, de esta forma se puede tener un control más estricto de la realización los ensayos para su control y caracterización.
- Es importante realizar pruebas y seguimientos a tramos experimentales donde se utilice el aditivo CECABASE RT[®], para comprobar los beneficios descritos en este documento, y encontrar las diferencias que se puedan entre los resultados de laboratorio y el trabajo en campo.
- Con el objetivo de estudiar nuevas técnicas, sería interesante realizar mezclas asfálticas tibias con otros productos tales como Advera[®] o Asphamin[®], entre otros, que se puedan encontrar en el mercado y cuyas reducciones en las temperaturas de producción puedan ser notables desde la elaboración del ligante.

8 BIBLIOGRAFÍA

- European Association Pavement Asphalt. The Use of Warm Mix Asphalt. En: EAPA position paper. January, 2010. vol. no. p. 1-13.
- Banerjee, Ambarish, de Fortier Smit, Andre, y Prozzi, Jorge A. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. En: Fuel. 2012.
- Calderón, Andrea Ulloa. Mezclas asfálticas tibias (MAT). En: Programa de Infraestructura y transporte PITRA. Abril 2011. vol. 2, no. 15, p. 1-6.
- CECA, website. (2011). http://www.ceca.fr/sites/ceca/en/business/bitumen_additives/warm_coated_material/warm_coated_material.page.
- CVV, Bitumix. Metodología SUPERPAVE para el Diseño de Mezclas Asfálticas. En: Julio, 2005. p. 1-15.
- D'Angelo, John, Harm, Eric, Bartoszek, John, Baumgardner, Gaylon, Corrigan, Matthew, Cowser, Jack, Harman, Thomas, Jamshidi, Mostafa, Jones, Wayne, Newcomb, Dave, Prowell, Brian, Sines, Ron, y Yeaton, Bruce. Warm-Mix asphalt: European Practice. En: International technology Scanning Program. February, 2008. p. 68.
- Davila, Juan Manuel. (2005). "Análisis comparativo de módulo resiliente y ensayos de deformación permanente en mezclas asfálticas tipo MDC-2 en briquetas compactadas con martillo marshall y compactador giratorio", Pontificia Universidad Javeriana.
- García, Marco Aurelio Oliveros. CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS BAJO METODOLOGÍA SUPERPAVE. En: 2010. p. 1-17.
- Garnica Anguas, Paul, Delgado Alamilla, Horacio, Gómez López, José Antonio, Romero, Sergio Alonso, y Alarcón Orta, Humberto Alonso. Aspectos del Diseño Volumétrico de Mezclas Asfálticas. En: 2004. vol. 246.
- Gómez López, José Antonio, Garnica Anguas, Paul, y Alamilla, Horacio Delgado. ALGUNOS ASPECTOS DE LA DENSIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EL COMPACTADOR GIRATORIO. En: 2003. vol. 228.
- GROUP, VETEK- CECA ARKEMA. (2008). "Aditivo CECABASE RT para Mezclas Tibias de Asfalto".
-

- Hajj, Elie Y, Ph.D. , y Cortez, Edward M. . EVALUATION OF THE CECABASE™ RT WARM-MIX ADDITIVE. En: September 2011, 2011. p. 4-6.
- INVIAS, Instituto Nacional Vias. (2007). "Normas de Ensayo para materiales de Carreteras".
- J. González-León, P. Caujolle, V. Luca. (2011). "Chemical Additives for Warm Mix Asphalts." In: *Congreso Mundial de Carreteras*, México.
- León, Hugo, y Lozano, Arenas. Tecnología del Cemento Asfáltico. 4ta Edición ed. 4, 2005. 108-200 p.
- Lesueur, Didier. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. En: *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. vol. 145, no. 12, p. 42-82.
- Rodríguez, Alejandro Padilla. (2010). "DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN CAPAS DE RODADURA DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS."
- Rubio, M. Carmen, Martínez, German, Baena, Luis, y Moreno, Fernando. Warm mix asphalt: an overview. En: *Journal of Cleaner Production*. 2011. vol. 24, p. 76-84.
- Silva, Hugo M. R. D., Oliveira, Joel R. M., Peralta, Joana, y Zoorob, Salah E. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. En: *Construction and Building Materials*. 2012. vol. 24, no. 9, p. 1621-1631.
- Speier, Gregory. Antecedentes del Diseño de Mezclas Asfálticas de Superpave. En: Noviembre, 1994. p. 1-170.
- Vera, Jonathan. (2012). "Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión," Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.