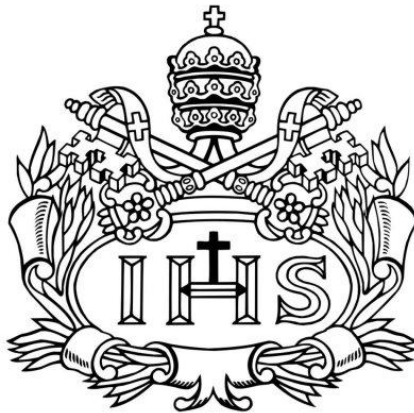


**INFLUENCIA DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE Y
ALMACENAJE EN LAS PROPIEDADES VISCO-ELASTICAS DE UN
LIGANTE ASFALTICO 60/70**

NICOLÁS CABRERA CORREA



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

**INFLUENCIA DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE Y
ALMACENAJE EN LAS PROPIEDADES VISCO-ELASTICAS DE UN
LIGANTE ASFALTICO 60/70**

NICOLAS CABRERA CORREA

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

**MARIA PATRICIA LEON
Ingeniera Civil M.s.c**



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

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	MARCO TEÓRICO.....	3
2.1.	Asfáltenos.....	4
2.2.	Máltenos	5
2.2.1.	Resinas	5
2.2.2.	Aromáticos	6
2.2.3.	Saturados	7
2.3.	Envejecimiento.....	8
2.3.1.	Volatilización	9
2.3.2.	Oxidación.....	9
2.3.3.	Cambios físicos, químicos y reológicos.	10
2.4.	Ensayos.....	12
2.4.1.	Penetración de los materiales asfálticos.....	12
2.4.2.	Ductilidad de los materiales asfálticos.....	12
2.4.3.	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos.....	12
2.4.4.	Viscosidad Brookfield	12
2.4.5.	Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT).....	13
2.4.6.	Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico. (DSR).....	13
3.	METODOLOGÍA	14
3.1.	Recopilación de las muestras.....	15
3.2.	Caracterización física y reológica	16
3.2.1.	Acondicionamiento de las muestras	16
3.2.2.	Caracterización física.....	17
3.2.3.	Caracterización reológica	21
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24
4.1.	Penetración de los materiales asfálticos.....	24
4.2.	Ductilidad de los materiales asfálticos.....	25
4.3.	Punto de ablandamiento de ablandamiento materiales bituminosos	26
4.4.	Viscosidad Brookfield.....	28

4.5.	Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT).....	29
4.6.	Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico. (DSR)	32
4.6.1.	Clasificación PG (Performance grade-grado de desempeño)	32
4.6.2.	Recuperación elástica mediante esfuerzo repetido (repeated creep)	37
5.	CONCLUSION	38
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de los asfáltenos

Figura 2. Estructura química de las resinas

Figura 3. Estructura química de los aromáticos

Figura 4. Estructura química de los saturados

Figura 5. Representación esquemática de la conversión de los componentes del asfalto al oxidarse

Figura 6. Esquema método experimental

Figura 7. Esquema etapa 2 recopilación de muestras

Figura 8. Montaje ensayo de penetración. Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 9. Montaje para ensayo de ductilidad. Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 10. Montaje ensayo punto de ablandamiento. Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 11. Montaje RTFOT. Pontificia Universidad Javeriana

Figura 12. Montaje viscosidad Brookfield. Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 13. Resultados penetración

Figura 14. Resultados ductilidad

Figura 15. Punto de ablandamiento

Figura 16. Índice de penetración o susceptibilidad térmica.

Figura 17. Viscosidad Brookfield original

Figura 18. Pérdida de masa (RTFOT)

Figura 19. Viscosidad Brookfield RTFOT

Figura 20. Módulo elástico vs módulo viscoso, asfalto original y envejecido

Figura 21. Módulo elástico vs módulo viscoso, asfalto original vs asfalto envejecido mediante RTFOT.

Figura 22. Evolución del ángulo de fase y el módulo complejo a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento, asfalto envejecido.

Figura 23. Evolución del ángulo de fase y el módulo complejo a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento, asfalto envejecido.

Figura 24. Variación del parámetro $G^*/\text{seno}(\delta)$, asfalto original

Figura 25. Variación del parámetro $G^*/\text{seno}(\delta)$, asfalto envejecido

Figura 26. Deformación (%) vs tiempo global (s)

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen caracterización física

Tabla 2. Resumen caracterización reológica

Tabla 3. Clasificación PG, original

Tabla 4. Clasificación PG, envejecido

1. INTRODUCCIÓN.

A lo largo de la última década hemos visto una evolución económica y social positiva de nuestro país y hoy por hoy Colombia se perfila como una de las economías más fuertes de la región. El impulso al sector minero, la recuperación del campo, la confianza inversionista, la continuidad de la seguridad democrática, entre otros, son algunas de las medidas nacionales que se pretenden utilizar para afianzar la posición del país frente a las economías vecinas.

El tratado de libre comercio no solo con los Estados Unidos de América, sino también con países como los son: Suiza, Méjico, Canadá, Chile, (Ministerio de comercio industria y turismo) se presenta como la oportunidad para poner a prueba la competitividad nacional y así mismo poder aprovechar y optimizar los beneficios conseguidos mediante la implementación de dichas medidas nacionales.

Un aspecto importante al que se le atribuye el éxito de estas economías, entre muchos otros, es su infraestructura de transporte; la malla vial de estas naciones se ha convertido en un eje de desarrollo, permitiéndoles fijar niveles superiores de eficiencia y con lo cual de competitividad.

En otras palabras la infraestructura de transporte y la logística son elementos clave para entrar en la dinámica de estas economías y no perder posición frente a ellas.

Por otro lado, si nos ubicamos dentro de nuestro territorio, podemos observar que la mayor concentración en la producción de bienes y servicios se da al interior del país (Región Andina), mientras que los puntos de exportación se encuentran en la costa, Pacífica o Caribe, (Región Pacífica y Caribe), a varios cientos de kilómetros de distancia. Es en este punto coyuntural donde nuestra infraestructura vial, juega un papel fundamental en la cadena que compone el transporte multimodal.

Según el instituto nacional de vías (INVIAS, 2009), el número de vías primarias pavimentadas asciende a 10370.26 km de las cuales el mayor porcentaje están construidas en pavimento asfáltico, de este número el 45.33% se encuentran en regular o mal estado y según recientes investigaciones una de las causas, dentro del espectro de posibilidades, a la cual se le atribuye este problema es el envejecimiento prematuro del ligante asfáltico.

El asfalto es un compuesto constituido esencialmente por cuatro grandes grupos: Saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos. Cada uno de los cuales proporciona características que definen el comportamiento de la mezcla (Swiertz, 2010). Los asfáltenos proporcionan dureza, rigidez y adhesión con la mezcla, mientras que los aromáticos, al ser tener un menor peso molecular, brindan manejabilidad y fluidez al asfalto.

Este compuesto, al igual que muchos otros elementos conocidos, está sujeto al fenómeno de oxidación provocado por la interacción con el oxígeno del aire (Vargas, Reyes, 2010), aunque también puede ser inducido mediante la aplicación de temperatura durante un periodo de tiempo (Cabrera et al, 2007). Este fenómeno de oxidación afecta el balance y las características de los elementos que componen la mezcla, por ejemplo: Al oxidarse el asfalto se presenta un aumento de los asfáltenos lo cual se exterioriza en un aumento de la viscosidad y dureza.

En conclusión cualquier cambio que se presente en la química de este compuesto se verá reflejado en el bajo desempeño y menor durabilidad de la capa asfáltica (siddiqui et al, 1999).

En este orden de ideas, podría tomarse en consideración la situación que se presenta actualmente en Colombia, donde la mayor refinería de crudo se encuentra en la zona norte del territorio, ocasionando que los tiempos de transporte hasta ciudades como: Neiva (lugar donde se realizó el proyecto), Ibagué o Cali, Oscile entre 15 y 18 horas a temperaturas alrededor de los 150°C.

Sumado a este hecho existe otro proceso más antes de mezclar el ligante con los agregados, y este es el almacenamiento. Durante este periodo el asfalto se encuentra a temperaturas no mayores a 80°C pero tampoco menores de 50°C, la ocurrencia de estos procesos previos da lugar a pensar que durante ellos podría existir algún tipo de afectación dentro del ligante.

Es por esta razón que el objetivo de este proyecto es efectuar seguimiento mediante una caracterización con ensayos físicos convencionales, y reológicos sobre un mismo material procedente de la refinería de Barrancabermeja, con el fin de evaluar la afectación de los procesos de transporte y almacenamiento sobre las propiedades visco-elásticas de dicho ligante asfáltico.

2. MARCO TEÓRICO.

El asfalto es una mezcla extremadamente compleja de más de mil diferentes tipos de hidrocarburos lineal o cíclico, parafínico, aromático o nafténico, saturado o insaturado, con o sin grupos funcionales o heteroátomos, como el oxígeno, nitrógeno y sulfuro. El asfalto es, por lo tanto, considerado como una dispersión coloidal, con grandes agregados moleculares llamados asfáltenos, que forman la fase dispersa (con un tamaño medio de 100 nm) y las parafinas saturadas, aceites aromáticos y resinas constituyen la continuidad de la fase (líquido), también llamada los máltenos (Kanabar, 2010; Vargas et al, 2008). Las propiedades macroscópicas de esta dispersión son enormemente dependientes de la temperatura y de la fracción de volumen de los asfáltenos (Vargas et al, 2008).

Esta dispersión se analiza mediante una cromatografía líquida SARA, que consiste en separar los compuesto livianos de los compuesto pesado. Los asfáltenos se obtienen, ya que son insolubles, mediante una precipitación con n-heptano, seguido a esto los máltenos se pasan a través de una cromatografía de columna donde se van identificando cada una de sus fracciones, los primeros en identificarse son los saturados ya que en el proceso de percolación con n-heptano

este no es absorbido por la alúmina CG-20 calcinada, después los aromáticos que son aquellos que si son absorbidos por la alúmina CG-20 calcinada y extraídos mediante la adición de tolueno y finalmente las resinas que son aludidas por la alúmina CG-20 calcinada después de que los saturados y los aromáticos son removidos.

En nuestro país el asfalto se consigue mediante procesos de destilación, obteniéndolo con propiedades características que les permiten ser usados para diferentes fines, pero general se presenta como un material de color negro, consistencia viscosa, pegajosa, por lo cual su adherencia con los materiales granulares se facilita, además gracias a su estructura química el asfalto es un excelente impermeabilizante no soluble en sales, álcalis o ácidos (Garnica et al, 2001).

2.1. Asfáltenos

El término se originó en 1837, cuando J.B. Boussingault definió a los asfáltenos como el residuo de la destilación del bitumen: insoluble en alcohol y soluble en trementina (Akbarzadeh et al, 2007). En la actualidad ante lo difícil de caracterizar todos los componentes en el crudo, los asfáltenos se definen como la fracción de crudo insoluble en solventes no polares de bajo peso molecular, pero solubles en tolueno, benceno, tetracloruro de carbono y disulfuro de carbono (Ospino, 2009).

Los asfáltenos son de color negro o café oscuro, altamente polares, proporcionas rigidez y durabilidad, son sólidos y totalmente amorfos, poseen una densidad a 20°C cercana a los 1,2 g/cm³ y carece de un punto de fusión definido (Ospino, 2009).

Las propiedades reológicas del ligante se encuentran estrechamente relacionadas con el contenido de asfáltenos (Swiertz, 2010), es por esta razón que cualquier cambio en la química del compuesto afecta este balance y da como resultado una

incompatibilidad, un bajo desempeño y una menor durabilidad (Siddiqui et al, 1999).

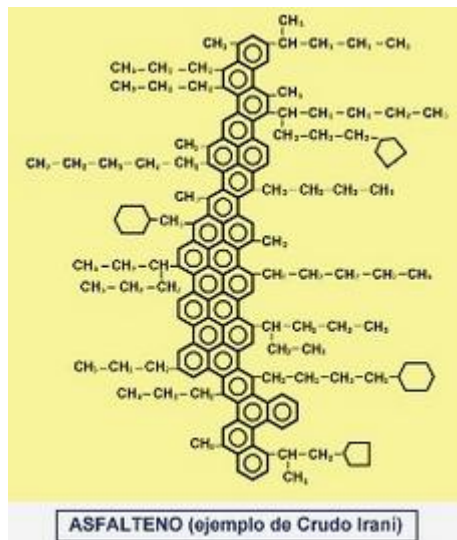


Figura 1. Estructura química de los asfáltenos

Fuente: Repsol

2.2. Máltenos

Debido a lo complejo de la composición, ya que él mismo es un derivado de la destilación del petróleo, el asfalto es usualmente separado en dos grupos llamados asfáltenos y máltenos (Kanabar, 2010).

Los máltenos son un compuestos de color marrón a marrón claro (<<http://www.repsol.com>> (2012)), con moléculas de bajo peso y que además son solubles en componentes orgánicos (Cabrera et al, 2007). Mediante una cromatografía este compuesto se puede subdividir en tres grandes grupos que son las resinas, los aromáticos y los saturados.

2.2.1. Resinas

Las resinas se encuentran de color marrón oscuro, y son moléculas altamente polares que actúan como un compuesto adhesivo y su densidad a 20°C esta

próxima a 1.07 g/cm^3 . La función principal de esta molécula dentro del asfalto es como un aglutinante y adherente, además ante procesos oxidativos se experimentan aumentos de este grupo lo que asimismo lleva a un aumento en la rigidez y viscosidad. (Swiertz, 2010; Kanabar, 2010) La presencia de este grupo dentro del asfalto se exterioriza en un aumento en el punto de ablandamiento y ductilidad y una disminución en la penetración y en el índice de penetración (Cabrera et al, 2007).



Figura 2. Estructura química de las resinas

Fuente: Repsol

2.2.2. Aromáticos

Los aromáticos son la fracción con menor peso molecular, con densidad a 20°C apenas menos a 1g/cm^3 , son cadenas donde predominan las moléculas insaturadas, son no polares y representan entre el 40% y el 65% del total de la composición de los asfaltos (Swiertz, 2010).

Ante el proceso de envejecimiento las bases nitrogenadas tienden a volatilizarse lo cual conlleva a un aumento en la porción de los asfáltenos, por ende un aumento en la rigidez y una disminución en la durabilidad y flexibilidad (Cabrera et al, 2007).



Figura 3. Estructura química de los aromáticos

Fuente: Repsol

2.2.3. Saturados

Los saturados tienden, mayoritariamente, a ser de color claro, poseen un peso molecular similar a los aromáticos de mas o menos 0.9 g/cm^3 a 20°C y representan entre un 5% y un 20% del peso molecular del asfalto (Swiertz, 2010; Lesueur, 2009).

Representan la fracción con menor polaridad y contribuyen con la preservación del asfalto ante el fenómeno oxidativo. La presencia de esta fracción en menor o mayor concentración modifica propiedades como el punto de ablandamiento, penetración, o la viscosidad, además de actuar como un fluidificante e impermeabilizante (Cabrera et al, 2007).

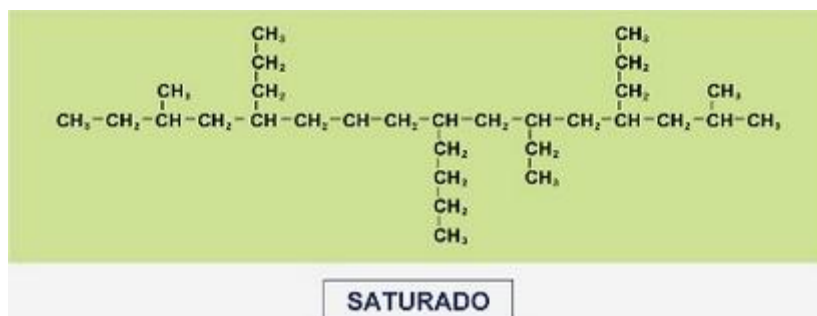


Figura 4. Estructura química de los saturados

Fuente: Repsol

2.3. Envejecimiento

El fenómeno de oxidación se define como el proceso mediante el cual un elemento reacciona con el oxígeno, con lo cual se presenta una pérdida de átomos, en otras palabras cambiando la estructura química, y en consecuencia envejeciendo el asfalto. Pero ante lo difícil que resulta describir este elemento, puesto que el mismo es un residuo de la destilación del crudo, a través de una fórmula química, resulta complicado poder predecir los cambios que en el interior de este ocurren (Don Brock, 1995).

La primera documentación sobre envejecimiento en el asfalto se dio por parte de Dow (1903), donde relaciono el calentamiento del asfalto extraído de mezclas asfálticas con la reducción de su peso y de los valores de penetración. En la actualidad, los ingenieros han entendido el comportamiento complejo del asfalto, con lo cual han llegado a determinaciones reológicas como las propiedades visco-elásticas (Vargas, Reyes, 2010) para evaluar la verdadera afectación de este fenómeno.

Este proceso de envejecimiento se presenta en el asfalto bajo dos fenómenos, volatilización y oxidación, cada uno de los cuales ocurre en momentos diferentes. La volatilización se presenta en la vida previa a la utilización de este como ligante, mientras que la oxidación ocurre en todo momento y mayoritariamente durante su vida de servicio.

Es decir que durante la vida previa a la utilización del asfalto como ligante dentro de una matriz de roca existen procesos que inducen este envejecimiento y que no se encuentran contemplados dentro de las metodologías de clasificación, según Mercado et al (2005) pruebas realizadas sobre muestras de un asfalto provenientes de la refinería y muestras provenientes del constructor utilizando la metodología *superior performing asphalt pavements* (superpave), demuestran que

tiempos prolongados de almacenamiento junto a altas temperaturas afectan las propiedades físicas y reológicas del asfalto.

2.3.1. Volatilización

La volatilización es el mecanismo de envejecimiento primario y está relacionado directamente con los procesos de transporte, almacenamiento y mezclado del material. Este fenómeno ocurre debido a la aplicación de temperatura, por encima de los 150°C aproximadamente, que ocasiona en el interior del material una volatilización de los compuestos más ligeros hecho que su vez se exterioriza en un aumento en la dureza, punto de ablandamiento, fragilidad y una disminución en la ductilidad y penetración (Cabrera et al, 2007; Swiertz, 2010).

2.3.2. Oxidación

Al igual que cualquier otra sustancia orgánica el asfalto reacciona con el oxígeno presente en la atmosfera, se considera entonces como una difusión física-reacción química que ocurre en al momento que el oxígeno penetra las capas del pavimento y reacciona con el asfalto. Este fenómeno está relacionado a la vida de servicio del asfalto como un ligante dentro de una matriz de roca, y se presenta a cualquier temperatura y en cualquier estado de su vida de servicio. El grado de oxidación depende, principalmente, de la composición del asfalto y de a temperatura ambiental donde se desarrolle su vida de servicio, aunque también existen otros parámetros que hay que tener que cuenta como son la química de los agregados o la exposición a los rayos UV (Swiertz, 2010).

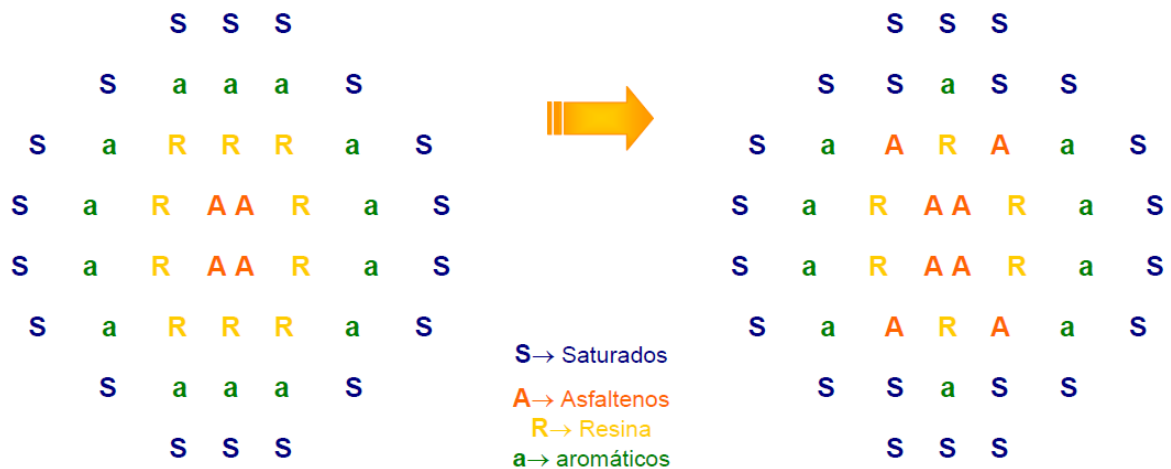


Figura 5. Representación esquemática de la evolución de los componentes del asfalto al oxidarse

Fuente: Cabrera et al, 2007

2.3.3. Cambios físicos, químicos y reológicos.

Las características del asfalto se ven directamente afectadas debido al fenómeno de envejecimiento sufrido durante la exposición de este ante elevadas temperaturas, o ante la interacción con las moléculas de oxígeno presentes en la atmósfera, esta afectación puede ser explicada mediante cambios en las propiedades físicas, químicas o reológicas.

2.3.3.1. Físicos

Los cambios químicos que presenta el asfalto se exteriorizan en un comportamiento físico diferente, es por eso que al evaluar un asfalto envejecido se puede evidenciar que se presenta un aumento en la temperatura del punto de ablandamiento, una disminución de la penetración, en valores cercanos al 30%, y así mismo en la ductilidad (Cabrera et al, 2007; Swiertz, 2010; Mercado et al 2010).

2.3.3.2. Químicos

Los cambios químicos que le ocurren al material se evidencian mediante la realización de una cromatografía líquida SARA, donde se puede observar una disminución de la fracción correspondiente a los aromáticos, ya que estos son la fracción con menor peso molecular, y por ende un aumento en el contenido de resinas y asfáltenos. Aunque es comúnmente aceptado que los aromáticos generan resinas y estos a su vez generan asfáltenos. Por otro lado los saturados tienden a permanecer estables gracias a su baja reactividad química (Swiertz, 2010; Kanabar, 2010; Lesueur, 2009).

2.3.3.3. Reológicos

Aunque la respuesta del asfalto ante el fenómeno de envejecimiento depende directamente con la composición del asfalto, pues como se dijo anteriormente este material es un subproducto de la destilación de crudo, es comúnmente aceptado que el primer parámetro de evaluación para definir si el asfalto ha sufrido un proceso de envejecimiento se da por el aumento en la viscosidad del material (Swiertz, 2010; Lesueur, 2009; Kanabar, 2010).

Este cambio en la respuesta del asfalto es evaluado mediante dos parámetros como, el módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ), dichos parámetros presentan cambios diferentes cuando se evalúa un asfalto envejecido. El ángulo de fase tiende a disminuir a medida que el asfalto se envejece, mientras que el módulo complejo tiende a aumentar. Este comportamiento se sustenta en la rigidización que ocasiona un comportamiento más elástico (Mercado et al, 2005; Al-Khateeb, Al-Akhras, 2010).

2.4. Ensayos

2.4.1. Penetración de los materiales asfálticos

Es un ensayo de caracterización física que permite la medida de la consistencia del asfalto, definida como la distancia hasta la cual penetra una aguja bajo condiciones de temperatura, tiempo y carga controladas (INV E 706,2007;ASTM D5-97).

2.4.2. Ductilidad de los materiales asfálticos

La ductilidad del asfalto es medida como la capacidad de estirarse o encogerse, lo que hace que sea también una medida del flujo (Oyekunle, 2007). La ductilidad es medida como la distancia a la cual ocurre la ruptura de una probeta sometida a tracción bajo condiciones de temperatura y velocidad controlada (INV E 702,2007).

2.4.3. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos

El concepto básico del ensayo define el punto de ablandamiento como la temperatura a la cual una esfera metálica es envuelta por el material bituminoso y cae una distancia de 25 mm. El ensayo es desarrollado bajo condiciones de temperatura controlada (INV E 712,2007).

2.4.4. Viscosidad Brookfield

Este ensayo se realiza con la ayuda de un viscosímetro rotacional, y se basa en el principio de medir el torque requerido para hacer girar un vástago cilíndrico sumergido dentro de la muestra (INV E 712, 2007).

Se efectúa el procedimiento bajo condiciones de velocidad y temperatura controladas, y sus resultados se utilizan principalmente para determinar

temperaturas de bombeo, temperaturas de mezclado para el asfalto y temperatura colocación del pavimento.

2.4.5. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT)

Este ensayo de envejecimiento de asfalto simula los cambios ocurridos durante los procesos de mezclado en caliente y la colocación del material dentro de la matriz de roca (Dessousky et al, 2010).

La teoría sobre la cual se basa el ensayo habla sobre la aplicación de temperatura (163°C) y aire a una cantidad de material específico. Los efectos de estos dos elementos se determinan a partir de los cambios sobre los ensayos antes y después del tratamiento en el horno (INV E 720, 2007).

2.4.6. Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico. (DSR)

Este método se utiliza para medir el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) de ligantes asfálticos usando un reómetro de corte dinámico y geometría de ensayo de platos paralelos. Este método está pensado para determinar las propiedades visco-elásticas de ligantes asfálticos (INV E 750,2007).

2.4.6.1. Clasificación PG (Performance grade-grado de desempeño)

La clasificación por grado de desempeño (PG) se relaciona con las condiciones a las que será sometido el asfalto su etapa de servicio, permitiendo determinar un rango de temperaturas que le permitan mantener unas condiciones óptimas de servisiabilidad. El análisis para altas temperaturas controla problemas de ahuellamiento, mientras que para bajas temperaturas controla problemas de fatiga (Wahhab et al., 1998).

3. METODOLOGÍA

Para evaluar la incidencia en las propiedades visco-elásticas de un ligante asfáltico 60/70 durante el transporte desde refinería, hasta el almacenamiento en planta, se llevó a cabo una metodología definida en cuatro fases. (Figura 2). La primera fase se enfocó en efectuar la revisión bibliográfica sobre el tema de estudio, la segunda se enfocó en el protocolo para la recopilación de las muestras, seguido a este se desarrollaron los ensayos de caracterización física y reológica del asfalto como tercera fase, y se concluye el trabajo con un análisis de resultados.

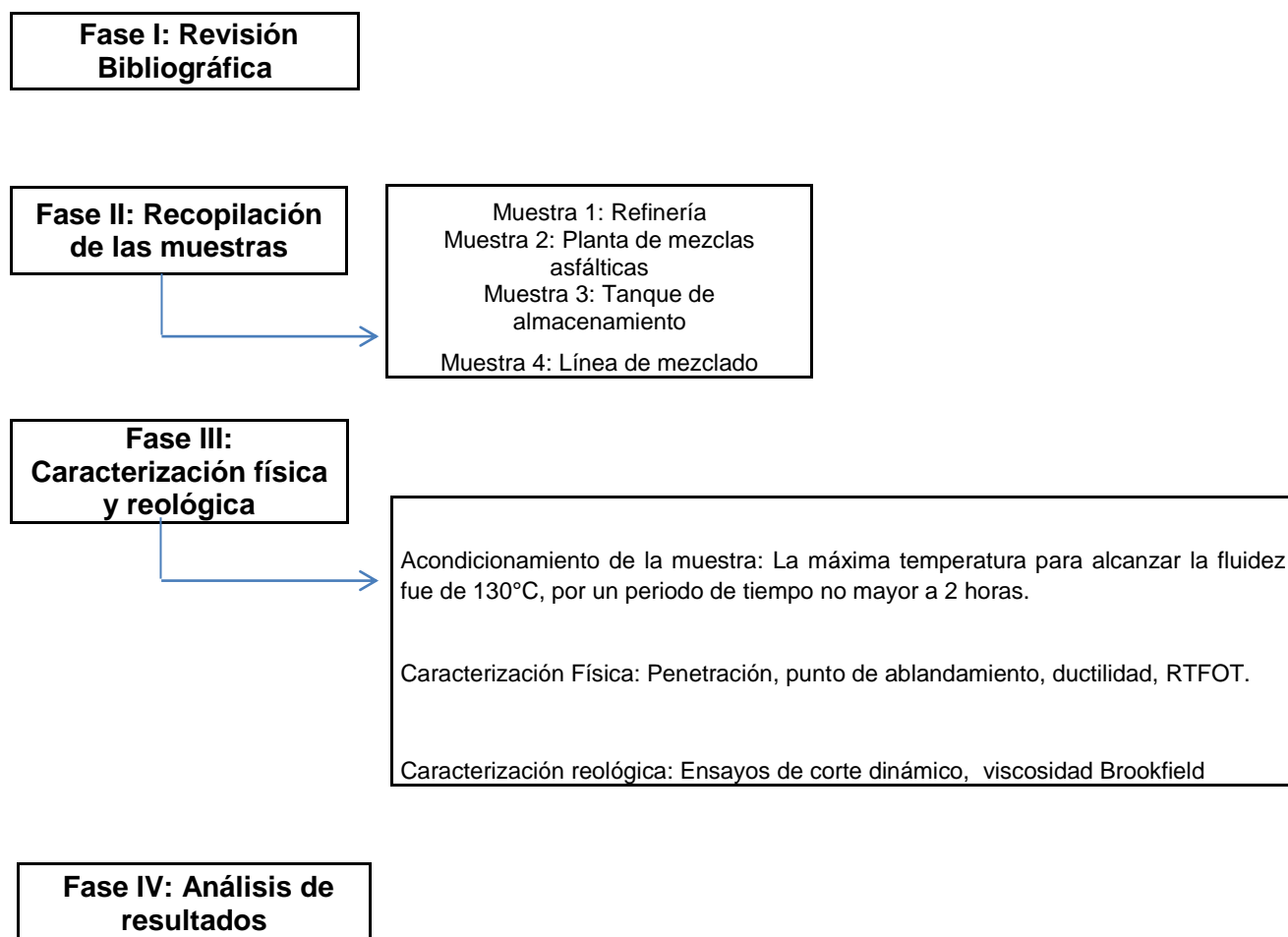


Figura 6. Esquema método experimental.

3.1. Recopilación de las muestras

El proceso experimental del trabajo se inicio con la recopilación de las muestras que se pudo llevar a cabo gracias a la colaboración de la empresa Construcciones Lago Ltda. Se tomaron muestras, con la ayuda de un galón metálico, en cuatro diferentes puntos, dos durante el proceso de transporte y dos durante el proceso de almacenamiento. Esto con la intención de realizar un seguimiento detallado del asfalto.

Muestra 1. Refinería (REF): La primera muestra se tomó directamente de la manguera que suministra el material, en otras palabras, sin permitir que hiciera contacto con el carro tanque que posteriormente transportaría el material cargado hasta la ciudad de Neiva.

Muestra 2. Planta de mezclas asfálticas (TRANS): Después de transcurridas alrededor de 17 horas de transporte, a una temperatura de aproximadamente 140°C-150°C se procedió a tomar la segunda muestra. Esta se extrajo justo al momento en el que llego el carro tanque a la ciudad de Neiva y antes de descargar en los tanques de almacenamiento.

Muestra 3. Tanque de almacenamiento (ALM): La tercera muestra se tomó después de dos días de almacenamiento a una temperatura que oscila entre los 50°C y los 80°C. Cabe resaltar que el material en ningún momento hizo contacto con un asfalto anterior que estuviese almacenado en el mismo lugar, pues previo a la llegada del carrotanque procedente de Barrancabermeja se había realizado un control de volúmenes que permitieran tener a disposición el tanque.

Muestra 4. Línea de Mezclado (MEZ): La cuarta y última muestra se tomó al tercer día de estar almacenado el asfalto, en el momento en que se elevó la temperatura entre 130°C y 140°C para empezar el proceso de mezclado con el material

granular. Dentro de la línea de mezclado se dispuso de una manguera alterna que permitiera acceder al asfalto.

A continuación se presenta de manera esquemática la etapa 1.

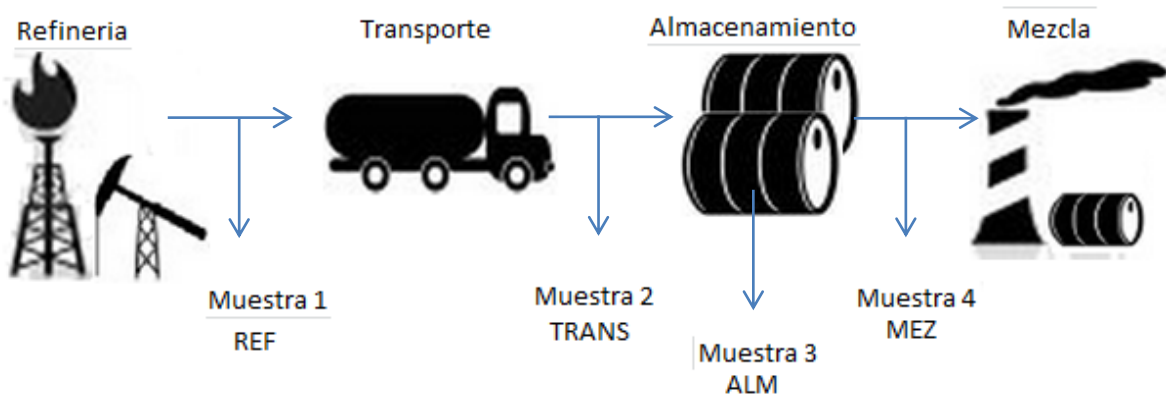


Figura 7. Esquema etapa 2 recopilación de muestras.

3.2. Caracterización física y reológica

3.2.1. Acondicionamiento de las muestras

El acondicionamiento de la muestra se realizó con la ayuda de un horno en conjunto con un termómetro, con el fin de garantizar que la temperatura de calentamiento nunca sobrepasara los 130°C, ya que como se expresa en las normativas nacionales (INVIAS) el asfalto no debe exceder en 90°C el punto de ablandamiento (el punto de ablandamiento se estima alrededor de 50°C), pues de lo contrario se podría inducir un envejecimiento u oxidación.

El tiempo de acondicionamiento fue de una hora y treinta minutos (1 h, 30 min) después de haber alcanzado los 130°C.

Este procedimiento de calentamiento se realizó para cada una de las muestras que se extrajeron a lo largo del proceso descrito en la figura 2, y nunca se realizó más de dos veces por muestra.

3.2.2. Caracterización física

La caracterización física se efectuó bajo los procedimientos descritos por la normativa nacional (INVIAS), y que se resume en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen caracterización física.

Asfalto	Evaluación	Procedimiento	Equipo	Parámetro
Asfalto 60/70 procedente de la refinería de Barrancabermeja	Penetración	Penetración para las 4 diferentes muestras	Penetrómetro	Penetración a 25°C con un peso de 100g
	Punto de ablandamiento	Ablandamiento para las 4 diferentes muestras	Aparato de anillo y bola	Punto de ablandamiento
	Ductilidad	Ductilidad para las 4 diferentes muestras	Ductilímetro	Ductilidad a 25°C
	RTFOT	Envejecimiento para las 4 diferentes muestras	RTFOT	Pérdida de masa, penetración y ablandamiento

3.2.2.1. Penetración de los materiales asfálticos.

Se prepararon 3 recipientes con diámetro de 55 mm y altura de 35 mm, los cuales se dejaron a temperatura ambiente (alrededor de 21°C) durante 1 hora después de haber vertido el asfalto fluido en cada uno de ellos. Seguido a esto se pasó a sumergirlos en un baño maría a una temperatura de 25°C durante un periodo de 1 hora.



Figura 8. Montaje ensayo de penetración. Pontificia Universidad Javeriana.

Finalmente se ensayaron cada una de las 3 muestras utilizando un penetrómetro, con una aguja de dimensiones definidas en la norma INV E 702, (2007) y utilizando un peso de 100 g durante un tiempo de 5 segundos para cada penetración.

La metodología se efectuó 2 veces para cada muestra extraída con el fin de obtener una repetitividad en los resultados. (INV E 702, 2007)

3.2.2.2. Ductilidad de los materiales asfálticos.

Una vez alcanzada la fluidez del material, se vertió en 2 moldes cuyas dimensiones se especifican en la figura 4, (Molde y placa para ductilímetro) para después dejarlos durante treinta minutos a una temperatura promedio de 21°C. Una vez transcurridos los 30 minutos se procedió a sumergirlos en agua previamente acondicionada a 25°C por un periodo igual de tiempo.

Como tercer paso se realizó el enrazado de los moldes y se sumergieron nuevamente los especímenes por un periodo de una hora y veinte y cinco minutos (figura 9), para finalmente ensayar las muestras en el ductilímetro a una velocidad de 5cm/min.

Cabe aclarar que el ensayo se detuvo una vez la muestra alcanzó los 130 ± 1 cm, pues el ductilímetro trabaja hasta dicho valor.

El procedimiento anteriormente descrito se efectuó dos veces por muestra extraída para de esta manera contar con un volumen de datos confiable.

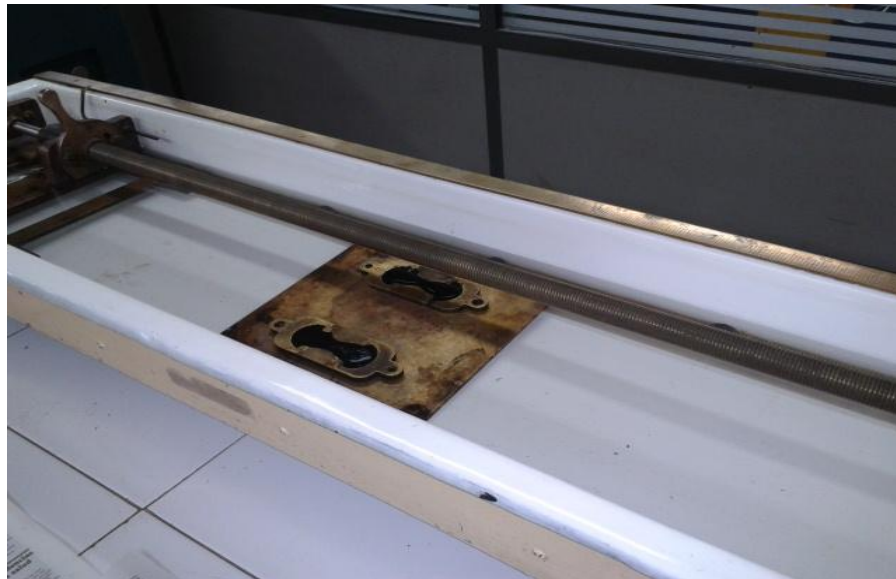


Figura 9. Montaje para ensayo de ductilidad. Pontificia Universidad Javeriana.

3.2.2.3. Punto de ablandamiento de materiales bituminosos aparato de anillo y bola.

Inmediatamente después de alcanzar la fluidez se vertió el material bituminoso dentro de dos anillos de bronce (Figura 10), para dejarlos a temperatura ambiente durante 30 minutos. A continuación se procedió a enrazar la muestra con la ayuda

de una espátula caliente para que nuevamente se acondicione a temperatura ambiente por un espacio de media hora.

Simultáneamente con lo anteriormente descrito, se preparó un vaso de agua destilada e hielo, pues el inicio del ensayo se da a una temperatura de $5\pm 1^\circ\text{C}$.

Después de culminada la segunda media hora, el agua alcanzó la temperatura indicada, se ubicó el montaje (Imagen 7) sobre una resistencia y se procedió a inducirle temperatura hasta que la esfera metálica tocara la base del aparato. Finalmente se tomó la temperatura (con la ayuda de un termómetro) a la cual se dio el suceso.

Con el fin de presentar repetitividad de la información obtenida al final del ensayo, el proceso se efectuó 2 veces por cada muestra extraída.



Figura 10. Montaje ensayo punto de ablandamiento. Pontificia Universidad Javeriana.

3.2.2.4. Ensayo en el horno de lámina asfáltica en movimiento delgada en movimiento (RTFOT)

Después de tener el asfalto fluido se prepararon 8 recipientes con un peso aproximado de 35 gramos de asfalto, seguido a esto se dejaron a temperatura ambiente por un periodo de 2 horas para después proceder a ubicarlas en el horno, que a su vez se había acondicionado a 163°C durante 16 horas previas a la realización del ensayo.

Finalmente se dio marcha al ensayo durante 85 minutos como lo describe la norma INV E 720, (2007). Este procedimiento se efectuó 2 veces por muestra extraída, una vez mas con la intención de corroborar resultados.



Figura 11. Montaje RTFOT. Pontificia Universidad Javeriana

3.2.3. Caracterización reológica

La caracterización reológica se efectuó siguiendo las normativas INVIAS, y se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. Resumen caracterización reológica

Asfalto	Evaluación	Procedimiento	Equipo	Parámetro
Asfalto 60/70 procedente de la refinería de Barrancabermeja	Clasificación PG	Temperatura de desempeño original y envejecida	DSR	G*/sen (δ)
	Creep compliance	Carga de 1 s, recuperación de 9 s.		% Deformación
	Viscosidad	Variación de la viscosidad a diferentes temperaturas	Viscosímetro Brookfield	Viscosidad a 135°C

3.2.3.1. Viscosidad Brookfield (Viscosímetro rotacional)

Seguido a esto se preparó el espécimen con un peso de 8 g, y se dispuso de una aguja N° 21. Simultáneamente al proceso de calentamiento y con la ayuda del viscosímetro y un termómetro para controlar la temperatura, se montó una secuencia de temperatura y frecuencia para evaluar la muestra previamente preparada.

Finalmente la muestra se ensayó con la ayuda de un viscosímetro rotacional.

Las temperaturas evaluadas fueron: 100°C, 115°C, 135°C usada como temperatura de control, 150°C y 163°C, con una frecuencia de: 10 rpm, 35 rpm, 50 rpm, 50 rpm, 50 rpm respectivamente. La máxima frecuencia evaluada fue de 50 rpm apegándose a la normatividad nacional.

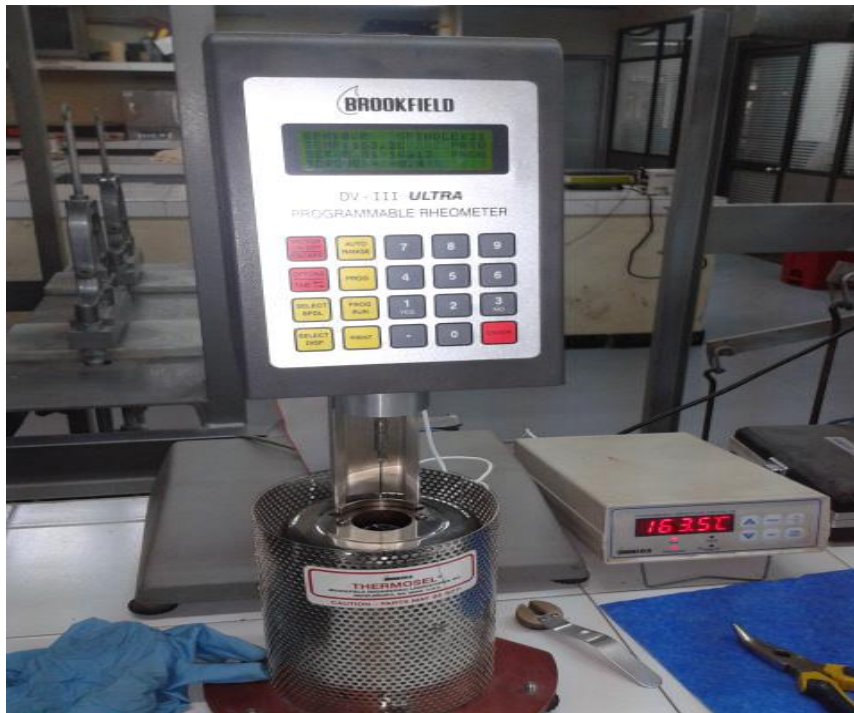


Figura 12. Montaje viscosidad Brookfield. Pontificia Universidad Javeriana.

3.2.3.2. Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico. (DSR)

La preparación de las pastillas se efectuó utilizando la geometría de 25 mm de diámetro, pues el objetivo del ensayo es evaluar las condiciones del asfalto en condición original, y después de haber experimentado un envejecimiento mediante RTFOT.

Por cada muestra extraída a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento se prepararon 4 especímenes para análisis del asfalto original y 3 para el análisis del envejecido. La temperatura inicial de ensayo se fijó en 58°C y se realizó una variación de 6°C por encima hasta llegar a 70°C para la verificación del parámetro $G^*/\sin(\delta)$

De igual manera, una de las pastillas preparadas para el análisis del asfalto original se utilizó para la evaluación del ligante ante la aplicación de una carga cíclica (Creep), este ensayo no se realizó hasta no haber definido la temperatura a la cual el asfalto cumplía las especificaciones superpave, $G^*/\text{seno}(\delta) > 1$ KPa para el asfalto original.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para el análisis de resultados se realizó una comparación entre los resultados obtenidos para cada una de las muestras y sin dejar de lado los parámetros fijados por la normatividad nacional.

4.1. Penetración de los materiales asfálticos.

Como lo establece la norma, los valores deben oscilar entre 60/70 1/10mm de penetración por espécimen. (INV E 706, 2007).

Los resultados obtenidos para cada una de las muestras se presentan en la figura 10. Dichos resultados expresan una tendencia uniforme que no expresa cambios relevantes en el asfalto, pero donde sí se aprecia que la menor penetración se experimentó en la muestra extraída justo antes del proceso de mezclado.

Los valores obtenidos corresponden a resultados típicos para este ensayo, por lo tanto se puede intuir que no se han experimentado procesos de oxidación influyentes.

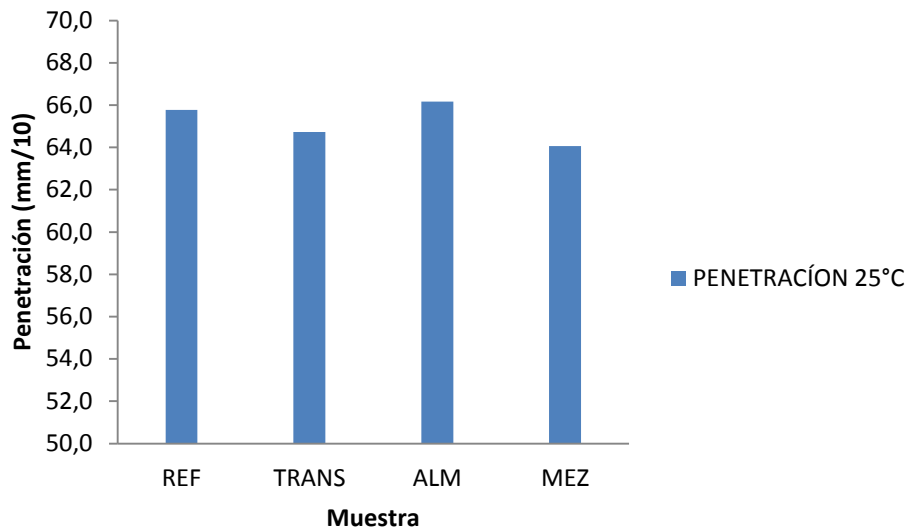


Figura 13. Resultados penetración

4.2. Ductilidad de los materiales asfálticos.

Una vez mas no se percibió una variación importante dentro de los resultados obtenidos. A cada uno de los especímenes ensayados se le permitió alcanzar una longitud de 130 cm, ubicándose, como se muestra en la figura 11, por encima del parámetro mínimo de 100 cm que se exige en la norma INVE 702. (2007)

Para este ensayo no se presentó una desviación estándar de los resultados, ya que cada una de las muestras ensayadas alcanzó una elongación de 130 cm, por lo cual no existe una dispersión que sea evidenciada en la desviación.

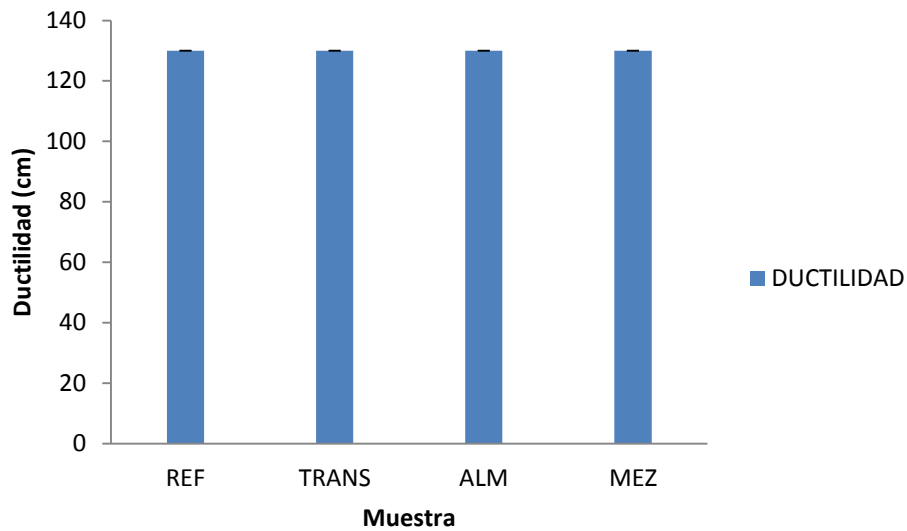


Figura 14. Resultados ductilidad

4.3. Punto de ablandamiento de ablandamiento materiales bituminosos

Con este ensayo más los dos anteriores, se completa la caracterización física típica que se le realiza al asfalto.

Una vez más los resultados que arrojaron los ensayos no revelaron cambios significativos dentro de la estructura del material. Los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango de 49.1°C y 50.5°C, valores típicos para este tipo de asfalto y además permitidos en las normativas nacionales (INV E 712, 2007).

Como se observa en la figura 12, la tendencia de las respuestas de cada una de las muestras presenta uniformidad entre las mismas, pero que al igual que en el ensayo de penetración la muestra 4 (MEZ) tiene una pequeña discrepancia. Para este caso el punto de ablandamiento aumento alrededor de 1°C.

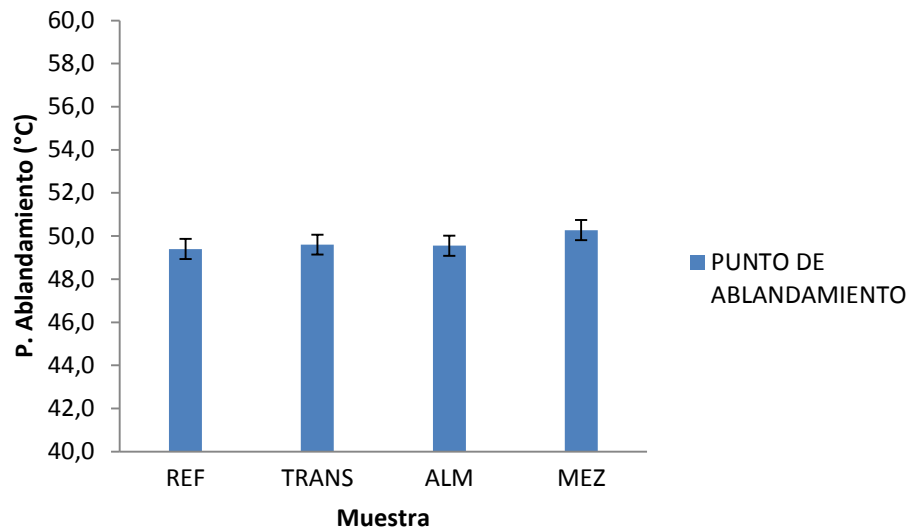


Figura 15. Punto de ablandamiento

Adicionalmente, con los resultados obtenidos de los ensayos de penetración y punto de ablandamiento podemos determinar el índice de penetración, parámetro que relaciona dichos ensayos y que permite conocer la influencia de la temperatura en la consistencia del asfalto.

Los resultados obtenidos se presentan en la figura 11, donde el valor mínimo de índice de penetración fue de -0.7, mientras que el máximo corresponde a -0.54. Los valores negativos indican una alta susceptibilidad a la temperatura.

La tendencia que se percibe en la figura 11 indica un comportamiento típico, pues el índice de susceptibilidad térmica mayor corresponde a la muestra extraída antes de mezclar el asfalto con los agregados, y por ende, que ha experimentado un proceso inicial de envejecimiento u oxidación. Por otro lado, si se analiza la desviación en la repetitividad de los resultados se perciben traslapos entre los mismos, razón por la cual se podría considerar que el material no ha experimentado cambios significativos.

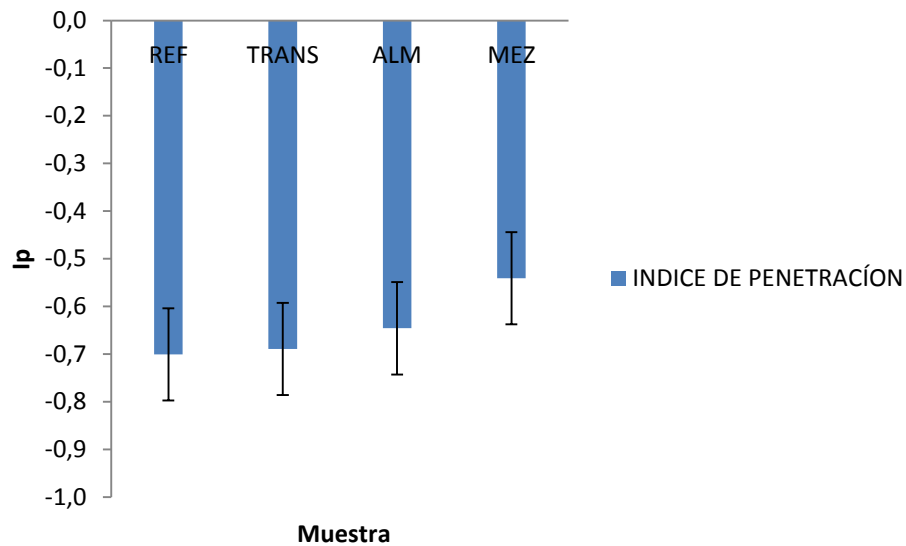


Figura 16. Índice de penetración o susceptibilidad térmica.

4.4. Viscosidad Brookfield

En la figura 13 se presenta la variación de la viscosidad para cada una de las muestras obtenidas. Como ya se había mencionado anteriormente la temperatura de control utilizada corresponde a 135°C, obteniendo resultados semejantes entre cada una.

La muestra 1 registro una viscosidad de 0.411 Pa*s, para la muestra 2 fue de 0.409 Pa*s, asimismo la muestra 3 presento una viscosidad de 0.405 Pa*s y finalmente para la muestra 4 se fijó una viscosidad de 0.412 Pa*s. Dicha respuesta resulta considerablemente aceptable según los resultados obtenidos por Lee et al (2007).

Adicionalmente a este control se efectuaron otros 4 puntos que permitieron efectuar una curva que describiera el comportamiento viscoso del asfalto.

De igual manera se puede apreciar una discrepancia para la viscosidad correspondiente para 100°C en la muestra 4 (Mez) con respecto a las demás obtenidas. Este resultado puede descartarse, ya que como se ha venido observando las muestras extraídas a lo largo del proceso presentan una tendencia prácticamente igual.

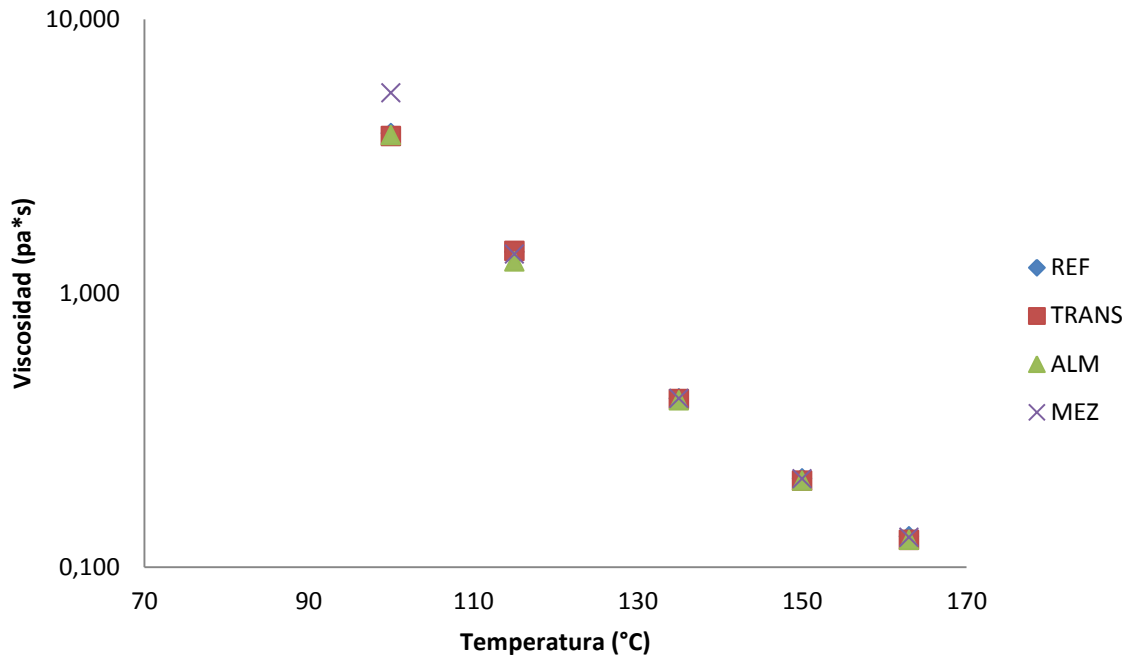


Figura 17. Viscosidad Brookfield original

4.5. Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento (RTFOT)

Al igual que los ensayos anteriores las normas de referencia utilizadas para clasificar el comportamiento del asfalto fueron las INV E (2007).

El residuo del ensayo permitió evaluar nuevamente el material, realizando, una vez más, penetración, punto de ablandamiento y viscosidad Brookfield además de determinar la pérdida de masa.

Los resultados de pérdida de masa se muestran en la figura 14, donde claramente se observa que no hay una diferencia marcada entre el comportamiento de cada muestra. Existe 1 valor que se aleja de la respuesta presentada por las demás muestras, pero que aún así estos resultados no exceden el máximo porcentaje de pérdida máxima expresada en la normativa nacional.

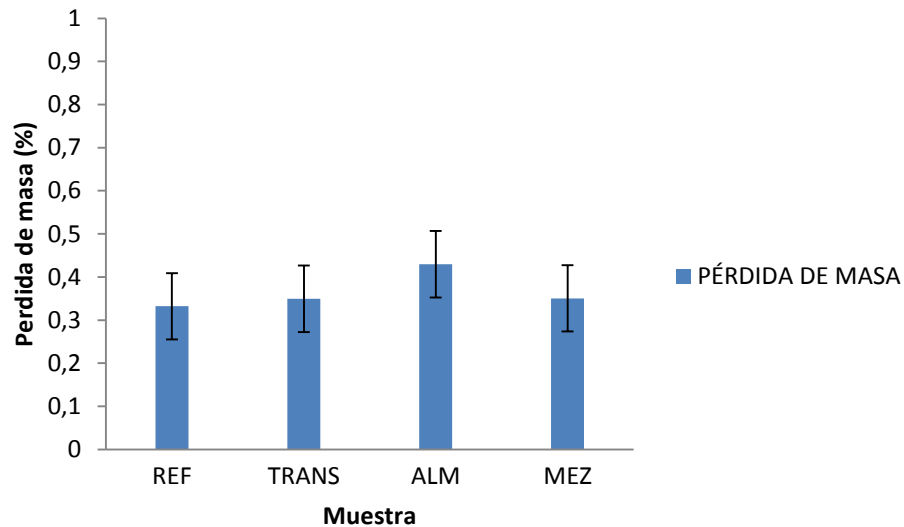


Figura 18. Pérdida de masa (RTFOT)

Como era de esperarse la penetración disminuyó, y alcanzó valores cercanos a 41 décimas de pulgada, mientras que la temperatura para alcanzar el punto de ablandamiento aumentó hasta valores cercanos a 54°C. Este cambio en la respuesta del asfalto se atribuye al fenómeno de oxidación, que ocasiona en el asfalto la evaporación de los compuestos ligeros, como lo son los saturados, y por ende el aumento de los compuestos pesados o asfáltenos (Vargas et al, 2008; Cabrera et al, 2007; Swiertz, 2010) lo cual finalmente se refleja en una rigidización del compuesto.

De igual manera, la viscosidad para cada una de las temperaturas aumento (Kanabar , 2010) de manera considerablemente similar, figura 19, en comparación con los resultados expuestos en la figura 17, permitiendo usar estos resultados para corroborar el hecho que el asfalto no está sufriendo cambios significativos durante los procesos de transporte y almacenamiento, o para este ensayo en particular, los cambios que ocurrieron se presentaron de forma uniforme.

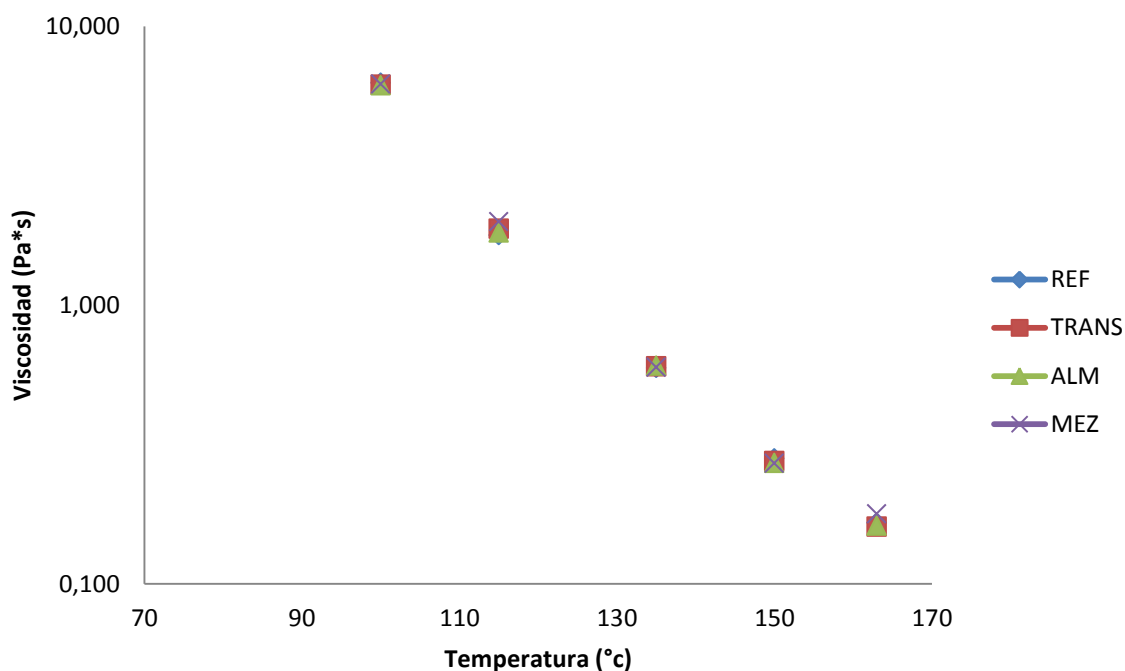


Figura 19. Viscosidad Brookfield RTFOT

La viscosidad para la temperatura de control de 135° vario entre 0.405 Pa*s y 0.412 Pa*s para el asfalto original, mientras que para el envejecido vario entre 0.595 Pa*s y 0.605 Pa*s.

4.6. Medición de propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico. (DSR)

El objetivo del ensayo es identificar un rango de temperatura en la cual el asfalto presenta una respuesta satisfactoria, pero para este trabajo en particular solo se evaluó el material a altas temperaturas puesto que las afectaciones de los procesos de transporte y almacenamiento están comprendidas dentro de un primer estado de envejecimiento, mientras que a bajas temperaturas se evalúan condiciones del asfalto después de envejecimiento a largo plazo.

4.6.1. Clasificación PG (Performance grade-grado de desempeño)

Para la clasificación por grado de desempeño, tanto para el asfalto original como para el envejecido, se utilizó el parámetro $G^*/\text{seno}(\delta)$, controlando así la resistencia total a la deformación y la elasticidad relativa. En la tabla 3 se presenta la clasificación de los resultados obtenidos para cada una de las muestras del asfalto original, y en la tabla 4, se resumen los resultados obtenidos para cada muestra después de realizar el tratamiento en la cámara RTFOT. El análisis en el DSR concluyó que la temperatura de clasificación PG corresponde a 64°C

Tabla 3. Clasificación PG, original

Muestra	Parámetro evaluado- $G^*/\text{seno}(\delta)>1$ KPa		
	Temperaturas (°C)		
	58	64	70
Refinería	3.30	1.40	0.64
Transporte	2.93	1.29	0.60
Almacenamiento	3.18	1.34	0.61
Mezcla	2.95	1.37	0.62

Tabla 4. Clasificación PG, envejecido

Muestra	Parámetro evaluado- $G^*/\text{seno}(\delta) \geq 2.2$ KPa		
	Temperaturas (°C)		
	58	64	70
Refinería	5.45	2.33	1.04
Transporte	5.40	2.34	1.05
Almacenamiento	5.64	2.45	1.05
Mezcla	6.65	2.75	1.20

A continuación en la figura 20 y 21 se presenta la tendencia elástica y viscosa para cada muestra, para el asfalto original y para el envejecido respectivamente.

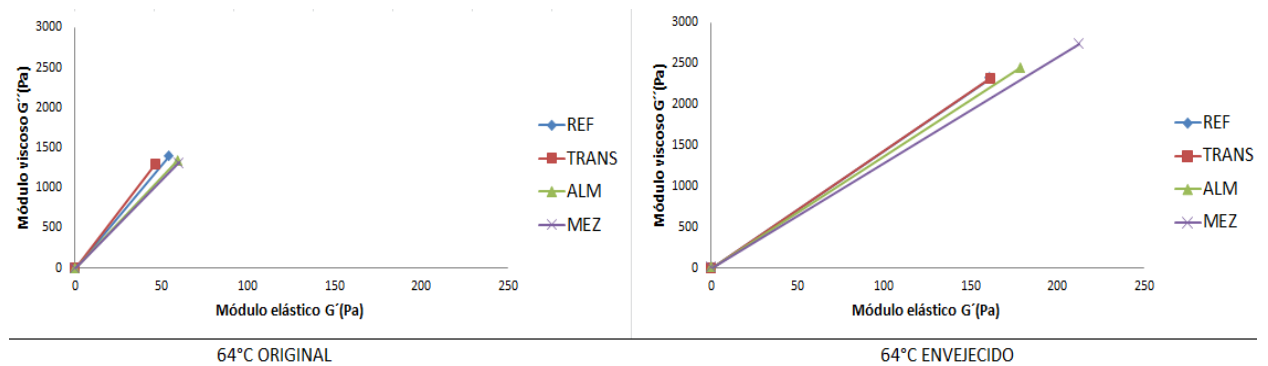


Figura 20. Módulo elástico vs modulo viscoso, asfalto original y envejecido.

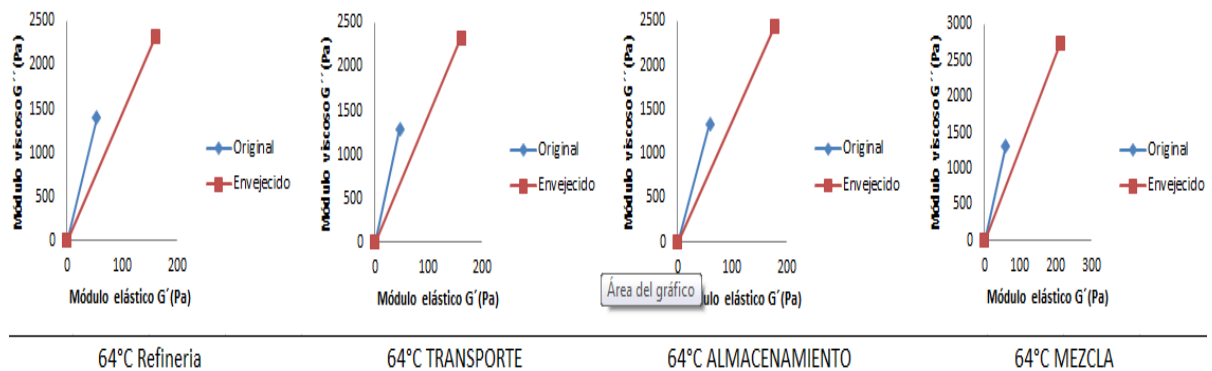


Figura 21. Módulo elástico vs módulo viscoso, asfalto original vs asfalto envejecido mediante RTFOT.

En las figuras 22 y 23 se presenta la evolución del ángulo de fase y módulo complejo a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento, tanto para el asfalto original como para el envejecido respectivamente.

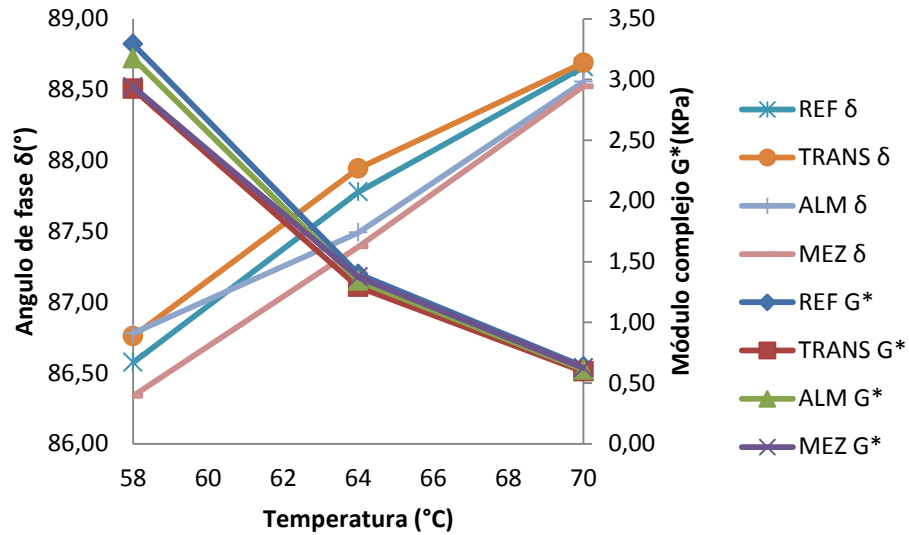


Figura 22. Evolución del ángulo de fase y el módulo complejo a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento, asfalto original.

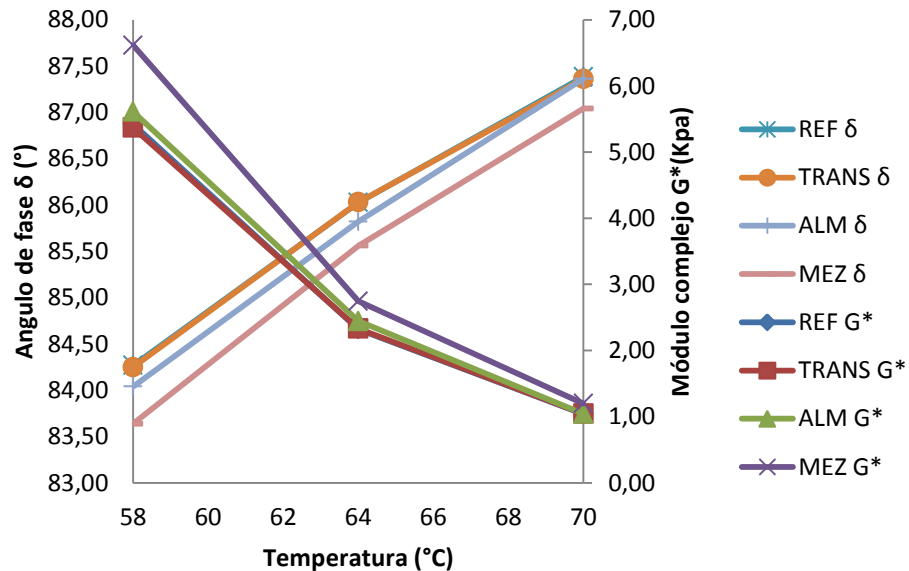


Figura 23. Evolución del ángulo de fase y el módulo complejo a lo largo de los procesos de transporte y almacenamiento, asfalto envejecido.

La tendencia que se percibe en la respuesta del material se refleja en el ángulo de fase y en el módulo complejo. La muestra extraída en la línea de mezclado presenta un ángulo de fase (δ) menor, tanto para el asfalto original como para el envejecido, y un marcado aumento en el módulo complejo (G^*) para el material después del tratamiento en la cámara RTFOT. En comparación con cada una de las muestras y temperaturas evaluadas, este comportamiento elástico se presenta cuando el ángulo de fase tiende a cero, (Al-Khateeb, Al-Akhras, 2010) o como se expresó anteriormente, el material tiende a rigidizarse y por lo tanto a presentar un comportamiento mas elástico.

El parámetro de clasificación $G^*/\text{seno}(\delta)$ para el asfalto original presenta una tendencia a igualarse a medida que la temperatura aumenta, figura 24, hecho que se aprecia también en el comportamiento del módulo complejo, figura 25.

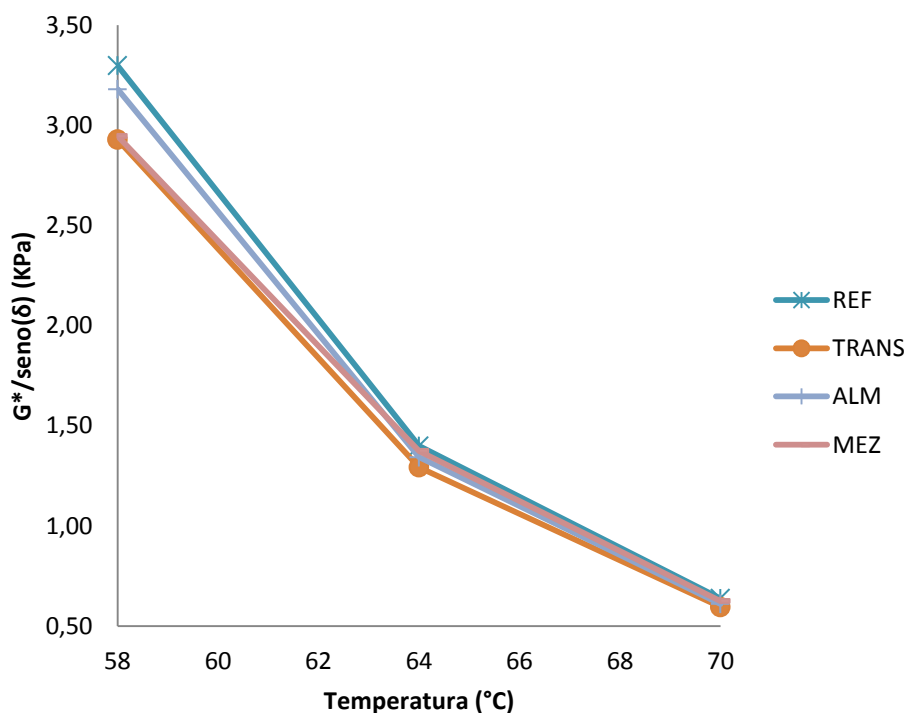


Figura 24. Variación del parámetro $G^*/\text{seno}(\delta)$, asfalto original

Por otro lado, si se observa la tendencia de la figura 25 se aprecia claramente que la muestra extraída durante la línea de mezclado presenta un comportamiento significativamente discrepante con las demás.

La temperatura y tiempo de almacenamiento, sumado a la contaminación (con otro ligante asfáltico anterior) que pueda existir dentro de los tanques de almacenaje son parámetros que se deben controlar (Mercado et al, 2005), pero ante el control volumétrico efectuado para evitar contaminación del material y el corto periodo de almacenamiento (3 días) a temperaturas no superiores a 80°C la única razón a la cual se le podría atribuir esta respuesta es a la reacción del asfalto ante la aplicación del calor, (Cabrera et al, 2007) no solo de aquel proceso experimentado durante la línea de mezcla, sino también del experimentado durante el ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento, (RTFOT) durante el desarrollo del presente trabajo.

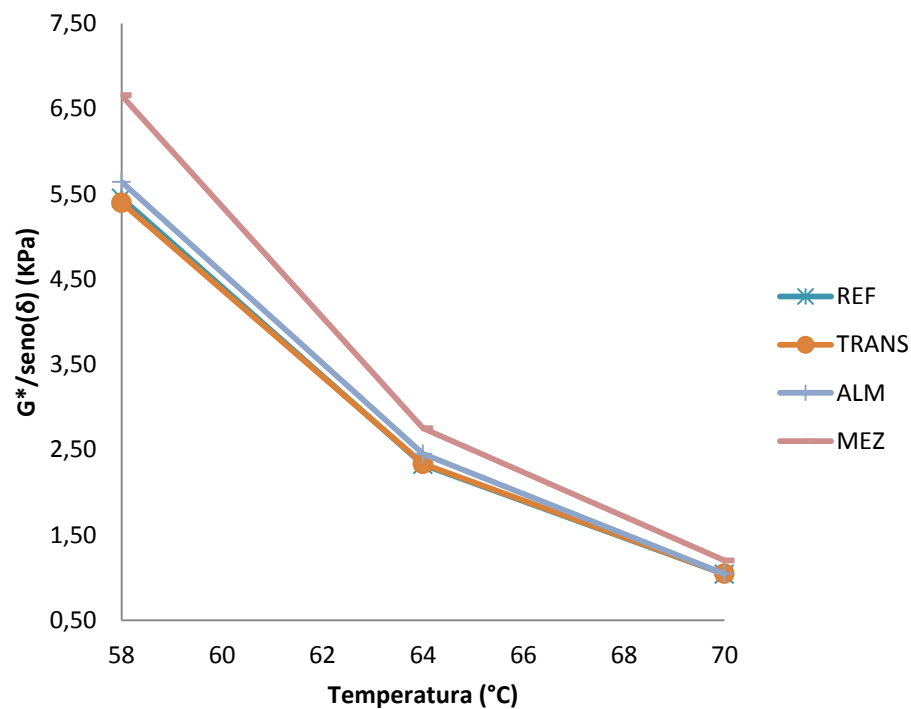


Figura 25. Variación del parámetro $G^*/\text{seno}(\delta)$, asfalto envejecido.

4.6.2. Recuperación elástica mediante esfuerzo repetido (repeated creep)

La respuesta del material ante un esfuerzo repetitivo se presenta en la figura 26, donde se percibe la misma tendencia que ha venido presentando. En este caso, la menor deformación corresponde a la muestra 4 (MEZ), dicha muestra, como se ha dicho anteriormente, corresponde a la extraída en la línea de mezclado razón por lo cual ya ha iniciado un proceso de envejecimiento.

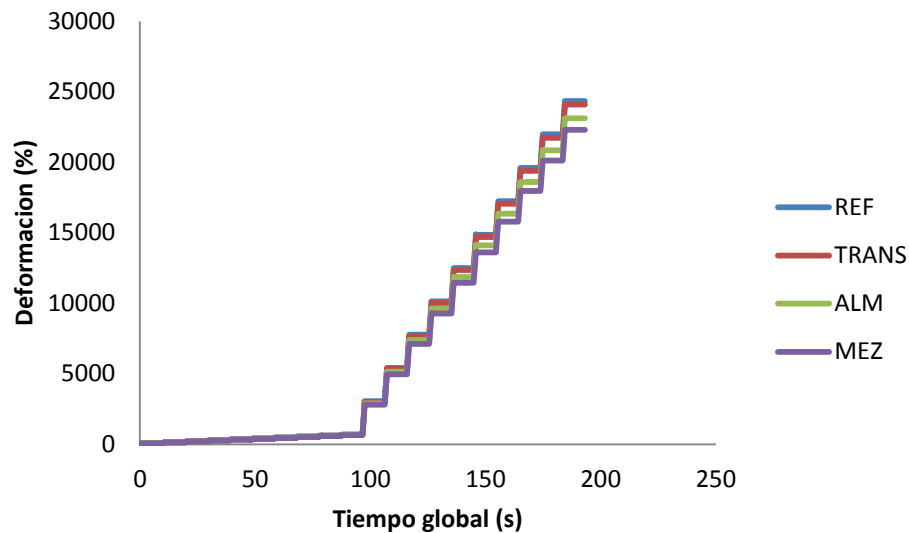


Figura 26. Deformación (%) vs tiempo global (s)

El valor promedio de deformación para el ensayo osciló entre 0.696% correspondiente a la muestra 1 (REF) y 0.512 correspondiente a la muestra 4 (MEZ). Este comportamiento se le atribuye al envejecimiento experimentado durante el mezclado, pues ocasiona en el material una rigidización y por tanto un comportamiento mas elástico (Mercado et al, 2005; Lesueur, 2009; Al-Khateeb, Al-Akhras, 2010), permitiéndole experimentar una menor respuesta de deformación ante las cargas impuestas.

5. CONCLUSION

Una vez realizado el seguimiento, durante un día de transporte y tres de almacenamiento, mediante ensayos físicos y reológicos sobre el ligante asfáltico, se puede concluir que las afectaciones de estos procesos en las propiedades visco-elásticas no son significativas. En los resultados de las pruebas realizadas no se evidenció una marcada diferencia en la respuesta del asfalto entre cada una de las muestras extraídas en los cuatro puntos de observación del fenómeno.

La caracterización reológica permitió establecer tendencias donde se evidenciaba una respuesta diferente en el ángulo de fase, módulo complejo y porcentaje de deformación para la muestra extraída en la línea de mezclado, pero a su vez poco discrepante con las muestras extraídas en la refinería, después de 17 horas de transporte y al segundo día de almacenamiento a temperaturas entre 50°C y 80°C.

En el caso de la muestra extraída en la línea de mezclado, y que por consiguiente había iniciado un proceso de envejecimiento, el ensayo de viscosidad Brookfield no permitió percibir esta diferencia, mientras que los ensayos realizados con el DSR, grado de desempeño y recuperación elástica mediante esfuerzo repetitivo, sí mostraron una diferencia expresada en la disminución del ángulo de fase (δ), aumento en el módulo complejo (G^*), y un porcentaje de deformación menor.

Como recomendación se plantea que los ensayos de caracterización física convencional no son suficientes para identificar esta pequeña diferencia, es entonces necesario complementar dichos ensayos con una caracterización reológica que permita realizar una descripción más detallada.

6. BIBLIOGRAFÍA

Al-Khateeb, Al-Akhras. 2010. Construction and building Materials. P. 926-932.

Daniel Swiertz, <<Rheological implications and laboratory techniques>>, University of Wisconsin, Madison, United States of America: 2010.

Domke H., Davison R. R., y Glover C. J. 2000 «Effect of Oxygen Pressure on Asphalt Oxidation Kinetics» *Ind. Eng. Chem. Res.*, Volume 39, pp. 592-598.

Don Brok, 1995, <<Oxidación en los asfaltos>>, Boletín técnico T-103S.

Dow, A. W, 1903. Asphalt Experiments at Washington. Engineering Record, Vol. 47, No.18.

Edith Arámbula Mercado, Amy Epps Martin, Eun Sug Park, Clifford Spiegelman, Charles J. Glover, 2005, <<Factors affecting binder properties between production and construction>>. Journal of materials in civil engineering ASCE/ January/ February.

Edna Rocío Cabrera, Cruz Marina Torres, Hugo Leon Arenas. 2007, <<Aplicación de la norma ASTM D-2007 con adsorbentes no convencional en el análisis de la composición química del asfalto envejecido>>. Facultad de ciencias naturales, exactas y de la educación, facultad de ingeniería civil. Universidad del Cauca, p. 1-12.

Garnica Paul, Pérez Natalia, 2001, <<Influencia de las condiciones de compactación en las deformaciones permanentes de suelos cohesivos utilizados en la construcción de pavimentos>>, Secretaria de comunicaciones y transporte, Instituto Mexicano del transporte.

I.N.V. E-702-07. «Ductilidad de los materiales asfálticos». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V E-706-07. «Penetración de los materiales asfálticos». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V. E-712-07. «Punto de ablandamiento de materiales Bituminosos (Aparato de Anillo y Bola) ». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V E-717-07. «Método para determinar la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Rotacional». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V. E-720-07. «Ensayo en el horno de lámina asfáltica delgada en movimiento». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V. E-724-07. «Índice de penetración de cementos asfálticos». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

I.N.V. E-750-07. «Medición de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos mediante el reómetro de corte dinámico». *Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras. Instituto Nacional de Vías, Colombia 2007.*

Kanabar Amit. 2010.<<Fisical and chemical aging behavior of asphalt cement from to northern Ontario pavements trials>>. Queen´s University, Kingston, Ontario, Canada.

Lesueur Didier, 2009. <<The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification>>. Advance in colloid and interface science .Elsevier. p. 42-82.

Mercado Arámbula, Martin Epps, Park Sug, Spiegelman Clifford, Glover Charles, 2005. <<Factor affecting binder properties between production and construction>>. Journal of materials in civil engineering ASCE.

Ministerio de Comercio Industria y Turismo, consultado el 2 de Diciembre de 2012, disponible en: <http://www.tlc.gov.co/#>

Ospino Guillermo. 2009. <<Aspectos generales del daño de formación por depositación de asfáltenos en yacimientos de petróleo>>. Universidad nacional de Colombia. Escuela de procesos y energía. Medellín. Colombia.

Oyekunle, L. O. 2007. «Influence of Chemical Composition on the Physical Characteristics of Paving Asphalts». *Petroleum Science and Technology* 25(11): 1401-1414.

Samer Dessousky, Chistopher Reyes, Mohammed Ilias, David Contreras, A.T. papagiannakis. 2011 <<Effect of pre-heating duration and temperatura conditioning on rheological properties of bitumen>>. *Construction and building Materials*. p. 2785-2792.

Siddiqui M.N. Ali M.F. 1999, <<Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts>>, *FUEL*, p. 1005-1015.

Soon-Jae Lee et al. 2008. <<Short-term aging characterization of asphalt binders using gel permeation chromatography and selected Superpave binder test>>. *Construction and building Materials*. P. 2220-2227.

Wahhab, Al-Abdul et al. 1998. «Performance-based characterization of Arab asphalt». *Building and Environment* 33(6): 375-383

X.A. Vargas, N. Afanasjeva, M. alvarez, P.H. Marchal, L. Choplin. 2008, <<Asphalt rheology evolution through thermo-oxidation (aging) in a rheo-reactor>>. *Fuel*.

Xiomara Vargas, Freddy Reyes, 2010,<< El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos>>, ingeniería e investigación, volumen 30, número 3, Universidad Nacional de Colombia, Bogota, Colombia, p. 27-44.

