

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil

Estudiante:

Ing. Sharline Pamela López Ramírez

Director:

Ing. M.Sc. Ph.D. Fredy Alberto Reyes Lizcano



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN INFRAESTRUCTURA VIAL
Bogotá D.C., 2014

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS COLOMBIANOS SOMETIDOS A PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO EN RTFOT Y UV ENTRE LAS 100 Y 200 HORAS”, desarrollado por la estudiante Sharline Pamela López Ramírez, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil, para optar el Título de Magister en ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director:

Ing.Fredy Alberto Reyes Lizcano

Jurado 1

Ing. Manuel Ocampo Terreros

Jurado 2

Ing. Oscar Reyes Ortiz

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

CARACTERIZACIÓN DE ASFALTOS COLOMBIANOS SOMETIDOS A PROCESOS DE ENVEJECIMIENTO EN RTFOT Y UV ENTRE LAS 100 Y 200 HORAS.

Sharline Pamela López Ramírez

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

*A Dios por darme la perseverancia
y fortaleza para lograr una meta
más. A mis padres porque sin su
apoyo y amor incondicional no
hubiese llegado hasta aquí.*

AGRADECIMIENTOS

A Diosito por darme la fortaleza y la perseverancia necesaria para llegar hasta aquí y cumplir una meta más en mi vida.

A mi familia porque son un pilar fundamental en mi vida y ser esas personitas que me llenan de felicidad, aún en la distancia. Especialmente a mis padres porque sin su amor incondicional, su confianza en mis capacidades y la educación que me brindaron hoy no sería quien soy y no estaría alcanzando este logro más.

Al Ing. Fredy Reyes Lizcano, director de mi proyecto, quien me ha ofrecido su continua orientación durante el desarrollo de esta investigación. Al Ing. Wilmar Fernández Gómez y al Químico Carlos Daza Velázquez, por compartir sus conocimientos y experiencia, los cuales han sido fundamentales para concluir de manera satisfactoria este proyecto.

A la Universidad de Costa Rica por el apoyo brindado para mi formación académica en el exterior. Al personal del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), principalmente al Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, Ing. Ellen Rodríguez Castro, al Químico Jorge Salazar Delgado y a la Laboratorista Química Vivian Bonilla Mora, por el apoyo brindado durante la ejecución de diferentes ensayos de laboratorio en esta institución.

Al personal de laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana y de la Universidad Distrital por su colaboración durante la ejecución de distintos ensayos de laboratorio, necesarios para el desarrollo de mi proyecto.

Además, agradezco al ICETEX, Colombia por el apoyo económico otorgado para el desarrollo de mi maestría y al Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto de Costa Rica por fungir como mediador para el otorgamiento de becas internacionales.

RESUMEN

Durante décadas se ha estudiado el comportamiento del asfalto ante procesos de envejecimiento, debido a su importancia en la industria de la construcción de pavimentos. El asfalto al envejecerse tiende a rigidizarse y ser más susceptible a la falla, no obstante, se ha observado una recuperación de la rigidización del asfalto ante ciertos rangos de exposición a la radiación UV. El presente trabajo se enfoca en evidenciar y analizar la posible recuperación del asfalto mediante la caracterización reológica y química de asfaltos colombianos 60/70 y 80/100 de la refinería de Barrancabermeja, sometidos a procesos de envejecimiento a corto plazo (RTFOT) y a diferentes periodos de exposición de radiación ultravioleta, comprendidos entre las 100 y 200 horas. La caracterización reológica se orientó en determinar el grado de desempeño para altas temperaturas, la ejecución del “Multiple Stress Creep Recovery”, el “Creep” Repetitivo y el barrido lineal de frecuencias. La caracterización química del asfalto se enfocó en la determinación de fracciones SARA, análisis elemental y el uso del espectrómetro infrarrojo. Mediante los ensayos químicos. Los resultados de la caracterización reológica son consistentes con los obtenidos del análisis químico, pues se observa una recuperación del asfalto entre las 150 y 175 horas de radiación UV para el asfalto 60/70 y una leve recuperación a las 150 horas para algunos ensayos y para otros a las 175 h UV para el asfalto 80/100. Se concluye que la recuperación del asfalto, para el rango de radiación estudiado, se genera por las modificaciones moleculares que se presentan en el material, cambiando el porcentaje asociado a las fracciones SARA y por lo tanto sus propiedades físicas y reológicas.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1	CONTEXTUALIZACIÓN	12
1.2	JUSTIFICACIÓN	15
1.3	OBJETIVOS	17
1.4	SÍNTESIS.....	17
2.	MARCO TEÓRICO	19
2.1	ASFALTO.....	19
2.3	ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO.....	19
2.3.1	Envejecimiento a corto plazo mediante la prueba RTFOT.....	20
2.3.2	Envejecimiento mediante la exposición a rayos UV	21
2.4	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO	22
2.4.1	Propiedades reológicas	22
2.4.1.1.	Reómetro de Corte Dinámico, DSR	23
2.4.1.2	Viscosidad Absoluta (60 °C).....	24
2.4.1.3.	Creep Repetitivo y Multi-Stress (MSCR).....	24
2.4.2	Propiedades Químicas.....	25
2.4.2.1	Análisis Elemental (C, H, N, S, O)	25
2.4.2.2.	S.A.R.A. por cromatografía	26
2.4.2.3.	Espectroscopía Infrarrojo (FTIR).....	29
2.4.3	Modelos Reológicos	30
3.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	32
3.1	ENVEJECIMIENTO DEL ASFALTO.....	32
3.2	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO	34
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA	35
4.1.1	Cromatografía SARA	35
4.1.2	Espectroscopía FTIR.....	39
4.1.3	Análisis Elemental	41
4.2	CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA.....	44
4.2.1	Grado de Desempeño.....	44
4.2.2	Viscosidad Absoluta (60 °C).....	47
4.2.3	Multi-Stress (MSCR).....	49
4.2.3.1	Modelo Burger.....	52
4.2.4	Creep Repetitivo	55
4.2.5	Barrido de frecuencias	56
4.3	DISCUSIÓN GENERAL.....	59
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
7.	ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Inversión Anual del Ministerio de Transportes en el sector carretero.	16
Figura 2: Reómetro de Corte dinámico.....	24
Figura 3: Representación del Modelo Burger.....	31
Figura 4: Fracciones SARA, asfalto 60/70.....	35
Figura 5: Fracciones SARA, asfalto 80/100.....	36
Figura 6: Relaciones entre las fracciones SARA, asfalto 60/70.....	37
Figura 7: Relaciones entre las fracciones SARA, asfalto 80/100.....	38
Figura 8: Espectro FTIR del asfalto 60/70.....	39
Figura 9: Espectro FTIR del asfalto 80/100.....	39
Figura 10: Área de sulfóxido (S=O) asociado a cada tipo de asfalto.	40
Figura 11: Área de sulfóxido (C=O) asociado a cada tipo de asfalto.	40
Figura 12: Contenido porcentual de oxígeno.....	42
Figura 13: Relación $ G^* /\sin(\delta)$ para diferentes temperaturas, asfalto 60/70.....	45
Figura 14: Relación $ G^* /\sin(\delta)$ para diferentes temperaturas, asfalto 80/100.....	45
Figura 15: Valor del Módulo Complejo (G^*).....	46
Figura 16: Valor del Ángulo de fase (δ).....	46
Figura 17: Viscosidad del asfalto a 60 °C.....	48
Figura 18: Valor del Módulo Complejo (G^*) a 60 °C.....	48
Figura 19: Valor del Ángulo de fase (δ) a 60 °C.....	49
Figura 20: Deformación contra tiempo de ejecución del ensayo MSCR a 64 °C, asfalto 60/70	50
Figura 21: Deformación contra tiempo de ejecución del ensayo MSCR a 58 °C, asfalto 80/100	50
Figura 22: Deformación medida (m) y calculada (c) con el Modelo Burger, para el asfalto 60/70.....	52
Figura 23: Deformación medida (m) y calculada (c) con el Modelo Burger, para el asfalto 80/100.....	53
Figura 24: Valores de la componente viscosa η_M al aplicar el modelo viscoelástico de Burger	54
Figura 25: Deformación contra tiempo global de ejecución para el ensayo de Creep repetitivo, asfalto 60/70.....	55
Figura 26: Deformación contra tiempo global de ejecución para el ensayo de Creep repetitivo, asfalto 80/100.....	55
Figura 27: Módulo Complejo (G^*) en función de la frecuencia, asfalto 60/70.....	56
Figura 28: Módulo Complejo (G^*) en función de la frecuencia, asfalto 80/100.....	57
Figura 29: Ángulo de fase en función de la frecuencia, asfalto 60/70.....	57
Figura 30: Ángulo de fase en función de la frecuencia, asfalto 80/100.....	57
Figura 31: Magnitud del parámetro alfa (α) para ambos tipos de asfaltos.	58
Figura 32: Porcentaje de resinas en función del porcentaje de aromáticos.....	59

Figura 33: Porcentaje de asfaltenos en función del porcentaje de resinas.....	60
Figura 34: Viscosidad absoluta (60 °C) en función del porcentaje de resinas.....	61
Figura 35: Módulo complejo (G^*) en función del porcentaje de resinas.	61
Figura 36: Viscosidad absoluta (60 °C) en función del porcentaje de asfaltenos.....	62
Figura 37: Módulo complejo (G^*) en función del porcentaje de asfaltenos	62
Figura 38: Relación entre el porcentaje de asfaltenos y el índice coloidal (IC).....	63
Figura 39: Viscosidad Absoluta en función de la componente viscosa η_M del modelo Burger.	64
Figura 40: Módulo Complejo en función de la componente viscosa η_M del modelo Burger.	64

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Valores estadísticos obtenidos del análisis de asfaltos 60/70 y 80/100 sometidos a diferentes condiciones de envejecimiento.....	14
Tabla 2: Valores de los parámetros del modelo Burger para un asfalto PG 64-28	31
Tabla 3: Materiales utilizados	33
Tabla 4: Contenido porcentual de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre	42
Tabla 5: Contenido molecular de cada tipo de asfalto, normalizado con respecto al carbono.	43
Tabla 6: Parámetros J_{NR} y capacidad de recuperación (% R), según el ensayo MSCR	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Promedio (Prom.) y desviación estándar (Desv.) de la medición de las fracciones "SARA para cada uno de los asfaltos.	72
Anexo 2: Relaciones entre las fracciones SARA para los diferentes tipos de asfaltos	72
Anexo 3: Área de Sulfóxidos (S=O) y carbonilos (C=O), calculados a partir del espectro generado por la técnica de espectroscopía infrarroja (FTIR)	73
Anexo 4: Resultados obtenidos en el ensayos de grado de desempeño (PG) a la temperatura alta para el asfalto 60/70.....	73
Anexo 5: Resultados obtenidos en el ensayos de grado de desempeño (PG) a la temperatura alta para el asfalto 80/100.....	74
Anexo 6: Resultados obtenidos para el ensayo de Viscosidad Absoluta (60°).....	74

1. Introducción

1.1 Contextualización

El asfalto es uno de los materiales más utilizados para la construcción de rutas pavimentadas. Sus propiedades han sido ampliamente estudiadas durante más de un siglo. (Vargas & Reyes, 2010). Sin embargo, ha existido un particular interés por el estudio del cambio de sus propiedades al exponerse ante las condiciones de servicio, especialmente al envejecerse.

El efecto de la rigidización del asfalto debido al envejecimiento lo hace más susceptible a la falla ante las cargas de servicio a las que se ve expuesto un pavimento, incidiendo en su vida útil. Lo que genera, entre otros aspectos, el deterioro de condiciones de confort y seguridad, necesitando una mayor inversión, por tratamientos de mantenimiento y rehabilitación que deben ser aplicados. (Bianchetto, Recasens, & Jiménez, 2012)

Vargas & Reyes (2010) mencionan en su artículo la evolución del estudio del fenómeno de envejecimiento de los asfaltos a través del tiempo, el cual se consideraba inicialmente como un proceso de endurecimiento físico, no obstante, con el pasar de los años se ha ido reconociendo la complejidad del fenómeno, intentando estimarlo inicialmente a partir del cambio de propiedades fisicoquímicas y ensayos empíricos tales como ductilidad, penetración, anillo y bola, y los índices de penetración, susceptibilidad a la temperatura, etcétera, hasta llegar a las determinaciones reológicas como las propiedades viscoelásticas del material una vez que los autores entendieron el comportamiento reológico complejo del asfalto.

Durieu et al. (2007) afirman que el proceso de envejecimiento es el responsable del deterioro de las propiedades físicas y mecánicas de los ligantes y que se genera en dos etapas. La primera es el envejecimiento a corto plazo debido al proceso de fabricación y construcción de una capa asfáltica, la cual es simulada en el laboratorio mediante la prueba

RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). La segunda se refiere al envejecimiento a largo plazo, la cual es causada a través de los años de servicio, generalmente simulado en el laboratorio por la prueba de envejecimiento a presión (*Pressure Aging Vessel, PAV*).

Rondón et al (2010) hacen énfasis a la relación directa entre la exposición a condiciones ambientales y el aumento en los valores de rigidez de la mezcla asfáltica, debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. Además, relacionan el aumento en rigidez con un incremento de la resistencia a la deformación permanente y disminución de la vida de fatiga de la mezcla analizada.

A pesar de que diversos estudios han evidenciado la rigidización del asfalto ante condiciones simuladas de envejecimiento (Vargas & Reyes, 2010). Amado y Rojas (2011) determinan en su investigación que tanto para el asfalto 60/70 como para el 80/100 sometidos a la exposición a la radiación ultravioleta sin tratamiento previo de RTFOT, se presenta recuperación entre las 50 y las 200 horas de exposición. Mientras que para el asfalto 60/70 sometido a envejecimiento en el RTFOT se presenta la recuperación entre las 100 y 200 horas de exposición.

Amado y Rojas (2011) aplicaron a cada tipo de envejecimiento en estudio (RTFOT y variación en la exposición a radiación ultravioleta) una serie de tres ensayos de ductilidad y penetración para caracterizarlos, a continuación se presentan los valores promedio, las desviaciones estándar y los coeficientes de variación (COV) del ensayo de penetración y ductilidad para los dos tipos de asfaltos analizados.

Tabla 1: Valores estadísticos obtenidos del análisis de asfaltos 60/70 y 80/100 sometidos a diferentes condiciones de envejecimiento

Tipo de asfalto	Condición de envejecimiento	Penetración (1/10 mm)			Ductilidad		
		Promedio	Desviación	COV	Promedio	Desviación	COV
Asfalto 60/70	Sin envejecimiento	61,00	1,45	2,4%	149,33	11,02	7,4%
	RTFOT	39,70	1,28	3,2%	113,67	7,77	6,8%
	RTFOT+ UV 50 h	33,00	1,00	3,0%	33,67	15,50	46,0%
	RTFOT+ UV 100 h	48,22	5,87	12,2%	58,00	7,81	13,5%
	RTFOT+ UV 200 h	35,89	1,39	3,9%	50,17	10,25	20,4%
	RTFOT+ UV 500 h	35,33	0,58	1,6%	20,00	0,00	0,0%
Asfalto 80/100	Sin envejecimiento	82,67	0,67	0,8%	141,33	7,57	5,4%
	RTFOT	49,50	4,07	8,2%	121,67	10,41	8,6%
	RTFOT+ UV 50 h	64,67	0,33	0,5%	50,67	10,02	19,8%
	RTFOT+ UV 100 h	63,56	0,84	1,3%	78,27	3,26	4,2%
	RTFOT+ UV 200 h	58,56	5,39	9,2%	86,67	8,62	9,9%
	RTFOT+ UV 500 h	38,78	0,84	2,2%	71,33	2,52	3,5%

Fuente: Amado y Rojas, 2011.

De los valores promedio de la ductilidad y penetración mostrados en la

Tabla 1 es posible identificar la tendencia a la recuperación que se presenta en asfaltos sometidos a envejecimiento a corto plazo (RTFOT) y a exposición a la radiación ultravioleta entre las 100 y 200 horas. Para el ensayo de penetración se observan coeficientes de variación bajos, en su mayoría menores a 5%. En el caso de la ductilidad se presenta una mayor variabilidad en los resultados, como lo muestran los valores de coeficiente de variación inferiores al 15%, exceptuando los obtenidos para el asfalto sometido a 50 horas de exposición de radiación ultravioleta, ya que para estos se obtienen desviaciones estándar altas por lo que el valor del coeficiente de variación aumenta considerablemente.

La investigación de Cuadro y Osorio (2012) se enfoca en investigar indicadores de envejecimiento de mezclas asfálticas a partir del análisis reológico de mastic. Como parte de las sugerencias de su estudio proponen realizar investigaciones en las que se analice el efecto

de los rayos UV entre las 75 y 250 horas de exposición en mezclas asfálticas, morteros, mastic y asfalto, debido a que se detectó un comportamiento atípico de los materiales analizados, los autores sugieren que este comportamiento se puede deber a un cambio químico en la composición del asfalto.

Adicionalmente, Fernández et al (2014) estudian los efectos de la radiación ultravioleta, del asfalto 60/70 y 80/100, expuestos a 50, 100, 200 y 500 h de exposición a la radiación, entre sus resultados evidencian una recuperación de la ductilidad entre las 50 y las 100 h de exposición, lo cual lo atribuyen a un incremento del porcentaje de resinas durante el envejecimiento a corto plazo.

Este proyecto de investigación se enfocará en caracterizar el comportamiento del asfalto envejecido en RTFOT y la exposición ultravioleta entre las 100 y 200 horas, desde el enfoque reológico y químico, específicamente se analizará el comportamiento atípico del asfalto que describen tanto Amado y Rojas (2011) como Osorio y Cuadro (2012) y Fernández et al (2014), en el que se identifica una recuperación del asfalto.

1.2 Justificación

La red vial colombiana es bastante extensa, según el Ministerio de Transporte (2011) la red total carretera es de aproximadamente 128.000 km, de los cuales la nación se encuentra a cargo de 17.143 km, para un total de 7.960 km de rutas clasificadas pavimentadas. Dada la extensa longitud de rutas colombianas, el estado invierte anualmente un presupuesto importante en el mantenimiento, rehabilitación, reconstrucción y construcción de obra nueva. Sólo para el año 2010 Colombia invirtió en el sector \$1.500,78 millones de dólares estadounidenses, según la tasa de cambio promedio para el año 2010 (ver Figura 1).

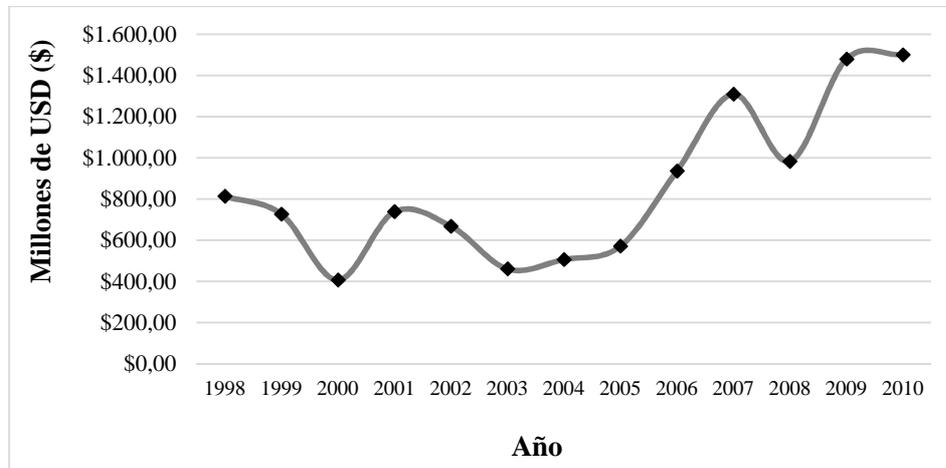


Figura 1: Inversión Anual del Ministerio de Transportes en el sector carretero.
Fuente: Ministerio de Transportes, 2011.

Dado que el asfalto es un material ampliamente utilizados en el sector de la construcción de carreteras, el estudio de sus propiedades toma particular importancia. Conocer las características del asfalto al ser expuesto a diferentes procesos que experimenta durante su vida útil, tales como el envejecimiento temprano debido a la fabricación y construcción, factores ambientales (temperatura, exposición a los rayos ultravioletas, humedad, entre otros) y exposición a las cargas del tránsito, predice con mayor exactitud su desempeño y por lo tanto permite generar mejores diseños de mezclas asfálticas y de estructuras de pavimentos, de manera que estén más acordes al nivel de servicio esperado durante su vida útil.

Esta investigación busca determinar las características químicas y reológicas del asfalto ante la exposición a la radiación ultravioleta en un corto tiempo de servicio (entre las 100 y 200 horas de exposición), debido a que las investigaciones anteriores de Amado y Rojas (2011) y Osorio y Cuadro (2012) afirman que se genera recuperación del asfalto en este periodo. El conocer e identificar los procesos internos que provocan la recuperación generarán un precedente para la investigación y generación de posibles técnicas de rejuvenecimiento del asfalto mediante el uso de radiación UV, así mismo, contribuir al estado del arte en cuanto a técnicas de mantenimiento y rehabilitación de asfaltos. Por otro lado ampliar el conocimiento

de las características de los asfaltos colombianos, específicamente de su proceso de envejecimiento ante la radiación UV, ya que según Bocci et al (2000), citado por Martínez y Caicedo (2005), el efecto de la radiación ultravioleta del asfalto es función de su origen.

1.3 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es determinar la afectación que experimentan los asfaltos colombianos 60/70 y 80/100 al ser sometidos a procesos de envejecimiento a corto plazo en RTFOT y a condiciones simuladas de servicio en la cámara de radiación UV entre las 100 y 200 horas.

Los objetivos específicos en los que se enfoca el desarrollo de este documento son:

- Caracterizar reológica y químicamente los asfaltos colombianos 60/70 y 80/100 en su estado original y asfaltos sometidos procesos de envejecimiento por medio del RTFOT y UV en intervalos de 25 horas en el periodo comprendido entre las 100 y 200 horas.
- Analizar la variación de las propiedades reológicas y químicas de los asfaltos en su estado original y después de ser sometidos a procesos de envejecimiento por medio del RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

1.4 Síntesis

En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos y conceptuales que fundamentan el desarrollo de esta investigación, tales como el concepto del envejecimiento del asfalto y la definición de propiedades reológicas y químicas. En el Capítulo 3 se muestra una descripción de los asfaltos de Barrancabermeja AC 60/70 y AC 80/100 utilizados, además se hace una descripción de la metodología aplicada para la ejecución de los diferentes ensayos ejecutados, tanto químicos (análisis elemental, cromatografía SARA y espectroscopía infrarroja), como los reológicos (grado de desempeño, viscosidad absoluta, creep repetitivo, Multi-Stress

Creep Recovery y barrido lineal de frecuencias). El Capítulo 4 expone los resultados obtenidos en esta investigación, así como su interpretación y su análisis con respecto a lo reportado en la literatura. El Capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas tras el desarrollo de esta investigación, las cuales hacen énfasis en los cambios químicos que se generan en el material. En el Capítulo 6 se muestran las referencias bibliográficas utilizadas.

2. Marco Teórico

2.1 Asfalto

El asfalto, según Vargas et al (2008), es considerado como “una mezcla compleja de una gran variedad de moléculas que difieren en su forma, tamaño y composición química dentro de las cuales se incluyen: parafinas, compuestos aromáticos, heterocíclicos, algunos heteroátomos como oxígeno, nitrógeno, azufre y en menor proporción metales como níquel, vanadio, hierro entre otros”.

2.3 Envejecimiento del asfalto

El concepto de envejecimiento utilizado en esta investigación es el definido por Lu & Isacson (2002), quienes afirman que el principal mecanismo de envejecimiento es irreversible, el cual se caracteriza por cambios químicos en el asfalto, los cuales generan modificaciones en sus propiedades reológicas. Los procesos que contribuyen con este tipo de envejecimiento son la oxidación, pérdida de componentes volátiles y la exudación. El segundo mecanismo es un proceso reversible, identificado como un endurecimiento físico, atribuido a la estructura molecular del asfalto, como lo es la reorganización de sus moléculas (o de sus microestructuras) para obtener un equilibrio termodinámico bajo condiciones específicas.

Vargas & Reyes (2010) enfatizan la evolución que se ha presentado en el estudio del fenómeno del envejecimiento, inicialmente fue considerado un fenómeno físico, no obstante, un mayor entendimiento del proceso permitió asociarlo con un cambio de las propiedades fisicoquímicas, las cuales eran determinadas mediante ensayos empíricos como ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, entre otras, hoy en día es fundamental incluir en el estudio del envejecimiento la determinación de sus propiedades reológicas, ya que estas caracterizan el comportamiento de un material viscoelástico como lo es el asfalto.

Bell (1989) cita a Peterson (1984) quien determina que los principales factores que generan envejecimiento del asfalto, por ende su endurecimiento, son la pérdida de componentes volátiles, cambios en su composición por reacción con el oxígeno de la atmósfera y cambios en la estructura molecular.

El envejecimiento oxidativo cambia la estructura molecular del asfalto, creando moléculas más largas y polares. (Bahia & Anderson, 1995; Petersen, 2009) Cuando la concentración de grupos funcionales polares comienza a ser lo suficientemente alta como para producir la inmovilización de una cantidad excesiva de moléculas, debido a las fuerzas intermoleculares, se disminuye su capacidad de fluir ante un esfuerzo térmico o mecánico. (Petersen, 2009)

En cuanto al efecto del envejecimiento en la mezcla asfáltica Rondón et al. (2010) enfatizan que ante la exposición al ambiente y a las cargas, se produce un aumento de la rigidez, debidos al endurecimiento del asfalto por procesos de envejecimiento del ligante asfáltico, este fenómeno genera una mayor resistencia a que se presente deformación permanente, pero hace al material más susceptible a la fractura.

Como parte de la extensa recopilación bibliográfica que realiza Bell (1989) en su estudio, determina que el envejecimiento del asfalto se genera a partir de dos etapas: envejecimiento a corto plazo generado por el proceso de manufactura y de construcción y el envejecimiento a largo plazo como producto de su exposición al entorno.

2.3.1 Envejecimiento a corto plazo mediante la prueba RTFOT

Actualmente, se emplean diferentes métodos para simular el envejecimiento a corto plazo del asfalto, tales como el método de envejecimiento de película fina (TFOT, por sus siglas en inglés) o el ensayo de lámina delgada en horno rotatorio (Rolling Film Thin Oven Test, RTFOT). (Vargas & Reyes, 2010)

El RTFOT es uno de los métodos más utilizados, consiste colocar una muestra de $35 \pm 0,5$ g dentro de un recipiente de vidrio normalizado, las cuales se encuentran sometidas a una temperatura de $163 \pm 0,5^\circ$ C durante un periodo de 85 minutos, mientras las muestras rotan estas son sometidas a una corriente de aire aplicada a presión constante. (AASHTO T240)

2.3.2 Envejecimiento mediante la exposición a rayos UV

La radiación solar se clasifica en tres categorías en función de su longitud de onda: ultravioleta (UV), visible (VIS), e infrarroja (IR). La longitud de onda de los rayos ultravioleta está entre 295 y 400 nm y constituye alrededor del 7% de la radiación total. Para Bogotá la longitud de onda de los rayos ultravioleta es de aproximadamente 305 nm, dato que se obtiene de la estación meteorológica ubicada en las coordenadas $04^\circ 42' N$ y $79^\circ 09' W$ y a una altura de 2.546 msnm. (Rodríguez & González, 1992)

La radiación ultravioleta es subclasificada según la magnitud de su longitud de onda en UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) y UVC (menor a 280 nm). La capa de ozono absorbe la totalidad de la radiación UVC, por lo que la superficie terrestre es alcanzada únicamente por la radiación UVA y UVB. (Martínez & Caicedo, 2005)

La alternancia entre periodos de exposición a la radiación con periodos de condensación es importante ya que mediante este procedimiento es posible simular la exposición real del asfalto en campo, el periodo en el que no se presenta la exposición a la radiación es fundamental, pues este permite que se presenten reacciones químicas en el material, las cuales afectan tanto sus propiedades físicas como químicas. (Amado & Rojas, 2011)

Reyes y Camacho (2008) sometieron el asfalto a la exposición de la radiación ultravioleta UVB y periodos de condensación en una cámara de radiación. A estas muestras se les realizaron pruebas en el reómetro de corte dinámico y se compararon con muestras originales. Los resultados obtenidos determinaron que existe incremento del módulo complejo sin importar el periodo de exposición. Como parte de sus conclusiones los autores

afirman que la radiación ultravioleta ocasiona la rigidización del asfalto, debido a su envejecimiento, por lo tanto una reducción de su vida útil al aumentar su fragilidad y por lo tanto su resistencia a la fatiga. (Reyes & Camacho, 2008)

Fernández et al (2014) sometieron asfaltos colombianos a radiación ultravioleta del tipo A, entre sus conclusiones generales se especifica una disminución en los valores de penetración y ductilidad, mientras que la temperatura del punto de ablandamiento aumentó al incrementar el envejecimiento (tiempo de exposición a la radiación), lo que implica un endurecimiento del material y una mayor susceptibilidad ante la fatiga, al convertirse en un material más frágil.

El equipo que se utilizará para simular el envejecimiento del asfalto es propiedad de Pontificia Universidad Javeriana. La cámara de envejecimiento posee ocho lámparas que emiten radiación con una longitud de onda de 340 nm, la cual se encuentra en el rango de la radiación UVA.

2.4 Caracterización del Asfalto

Actualmente el asfalto es caracterizado mediante numerosos ensayos de campo y laboratorio, sin embargo, estos pueden ser clasificados en tres grupos de ensayos generales: físicos, químicos y reológicos. (Vargas & Reyes, 2010)

2.4.1 Propiedades reológicas

La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia. Las características reológicas del asfalto a una temperatura están determinadas por su constitución (composición química) y la estructura (disposición física) de las moléculas en el material, por lo que un cambio en la constitución y/o su estructura generará cambios en su reología. (Read & Whiteoak, 2003).

Para entender de una mejor manera la reología es necesario conocer diferentes conceptos relacionados, definidos por Afanasieva y Álvarez (2004) de la siguiente manera:

- **Módulo Complejo de Corte (G^*):** *es la relación entre el valor absoluto de la tensión de corte en oscilación aplicada (τ), sobre la deformación angular obtenida (γ), consecuencia de esa carga en valor absoluto y es una medida de la resistencia total de un material para deformarse cuando es repetidamente sometido a esfuerzos constantes. Por tratarse de una carga sinusoidal se relaciona con un ángulo de desfase (δ). El módulo complejo consiste en dos partes: elástica (recuperable) y viscosa (no recuperable).*
- **Ángulo de Fase (δ):** *es el ángulo entre la deformación sinusoidal aplicada y la resultante del esfuerzo sinusoidal resultante en una prueba de deformación controlada; o entre el esfuerzo aplicado y la resultante en una prueba de esfuerzo controlado. Es un indicador de las cantidades relativas de deformación recuperable y no recuperable. Toma el valor de 90° cuando el material se comporta como viscoso puro y cero cuando es un material elástico puro.*
- **Componente Viscosa, G'' :** *es el producto del módulo complejo por el seno del ángulo de fase. Esta componente representa una medida de la pérdida de energía (disipada durante el ciclo de carga) en forma de calor durante el proceso de deformación.*
- **Componente Elástica, G' :** *es el producto del módulo complejo por el coseno del ángulo de fase. Esta componente es una medida de la energía almacenada durante el ciclo de carga.*

2.4.1.1. Reómetro de Corte Dinámico, DSR

Con este equipo es posible medir el efecto que el tiempo de la aplicación de la carga y la temperatura tienen sobre el asfalto, una de sus virtudes es que es capaz de medir el módulo complejo y el ángulo de fase a temperaturas altas e intermedias. (Instituto del Asfalto, 1998)

El principio de operación de este equipo es descrito por el Instituto del Asfalto (1998) en el que el asfalto se coloca entre un plato fijo y uno giratorio (Figura 2), el plato superior oscila del punto A al B, después al punto C, pasando por A y de regreso, a lo que se le denomina ciclo.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

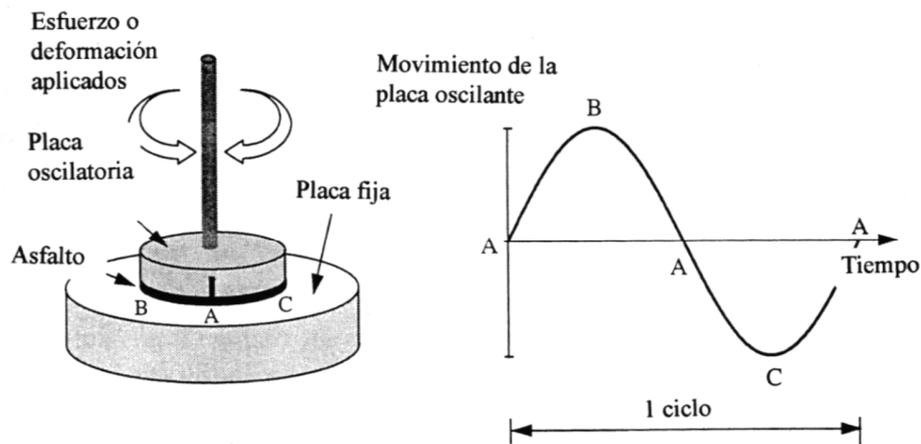


Figura 2: Reómetro de Corte dinámico

Fuente: Instituto del Asfalto, 1998.

2.4.1.2 Viscosidad Absoluta (60 °C)

Este ensayo se ejecuta para determinar la consistencia del asfalto a 60 °C. Es un parámetro que permite valorar el efecto de la temperatura en su comportamiento y relacionarlo tanto con la producción de mezcla asfáltica como su colocación. Adicionalmente, este ensayo es utilizado como parámetro fundamental para caracterizar el asfalto según la clasificación por grado de viscosidad. (Salazar Delgado, 2013)

2.4.1.3 Creep Repetitivo y Multi-Stress (MSCR)

En los pavimentos en realidad no se presentan cargas reversibles que lleven al material asfáltico a una deformación cero, por el contrario el mecanismo de deformación (creep) es repetitivo con pulsos de carga del tipo sinusoidal. La capa del pavimento asfáltico recupera alguna deformación debido a la energía elástica almacenada en el material, de manera que la energía se disipa en amortiguación (debido su naturaleza visco-elástica) y en flujo permanente. La energía de amortiguamiento es recuperable en su mayoría con el tiempo, no obstante, la relacionada con el flujo permanente se disipa. Se considera que la energía

disipada permanentemente es la responsable de la deformación permanente de las mezclas asfálticas. (Loría, 2012) Tanto el ensayo del creep repetitivo, como el multi-stress pretenden simular este comportamiento.

En general, estos ensayos tienen como objetivo medir las propiedades viscoelásticas de un asfalto, Sandoval & Cremades (2007) describen este tipo de prueba de la siguiente manera:

“Consiste en aplicar a un material un esfuerzo determinado, causando con esto una deformación (creep), después de un periodo determinado en el cual se mantuvo el esfuerzo constante, se retira totalmente el esfuerzo aplicado, dejando así que la estructura del material se recupere de la deformación causada con el esfuerzo aplicado (recovery). Este proceso puede realizarse en un solo ciclo, incluyendo un paso de deformación y uno de recuperación o en ciclos repetidos en el cual pueden realizarse varios pasos consecutivos de deformación-recuperación, en este caso es posible evaluar la deformación acumulada por la aplicación de cargas repetidas.”

2.4.2 Propiedades Químicas

Ardilla y Granados (2012) mencionan que la caracterización química del asfalto se relaciona con las modificaciones moleculares de los asfaltos, principalmente en los hidrocarburos (compuestos de hidrógeno y carbono).

Para caracterizar químicamente el asfalto se utiliza, entre otras metodologías, el análisis elemental, S.A.R.A por cromatografía y la espectroscopía infrarroja

2.4.2.1 Análisis Elemental (C, H, N, S, O)

Este análisis consiste en determinar el valor porcentual de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. El elemento predominante en el asfalto es el carbono (80-85%), seguido por el hidrógeno (9-11%). No obstante, debido a la existencia de heteroátomos en las

moléculas de hidrocarburo, se presentan otros elementos, tales como el azufre (0-7%), nitrógeno (0-3%) y oxígeno (0-2%). (Afanasieva & Álvarez, 2004)

Diferentes hipótesis han relacionado el contenido de los heteroátomos con el desempeño y las propiedades del asfalto. Altos contenidos de azufre en el asfalto genera que estos sean menos susceptibles a la temperatura. Sin embargo, un alto porcentaje de azufre puede ocasionar que se presente la oxidación de este a sulfuros o sulfóxidos, por lo que esto incrementaría su dureza y viscosidad. Adicionalmente, se relaciona la presencia de nitrógeno con la adhesión asfalto-agregado y con la susceptibilidad del material al agua. (Afanasieva & Álvarez, 2004)

Dado que Bell (1989) afirma que entre los principales factores que generan envejecimiento del asfalto se encuentran los cambios en su composición por reacción con el oxígeno de la atmósfera y cambios en la estructura molecular, se espera que el contenido porcentual de oxígeno en el asfalto aumente al aumentar su envejecimiento.

2.4.2.2. S.A.R.A. por cromatografía

A pesar de la complicada composición química del asfalto, es posible separarlo en dos grandes grupos químicos: asfaltenos y maltenos. A su vez los maltenos pueden ser subdivididos en saturados, aromáticos y resinas. En general, se habla de cuatro fracciones, considerando las tres aportadas por los maltenos y los asfaltenos. (Read & Whiteoak, 2003). Mediante la aplicación del ensayo por cromatografía es posible determinar el contenido porcentual de saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos (S.A.R.A).

Cárdenas & Fonseca (2009) citan a Montejo (2002) quien se refiere a la constitución química del asfalto de la siguiente manera:

En el modelo micelar, se supone que el asfalto está formado por grandes moléculas de asfaltenos rodeadas por aromáticos polares y no polares, suspendidas en aceites saturados, todos los constituyentes peptizados en una solución coloidal. Los

saturados y aromáticos se pueden considerar como los medios de dispersión de los aromáticos polares, que son los responsables del comportamiento viscoelástico del asfalto a temperatura ambiente.

En cuanto al efecto de la composición del asfalto en la reología, Read & Whiteoak (2003) afirman que manteniendo constante la cantidad de asfaltenos y variando las otras tres componentes se tiene que:

- Al incrementar el contenido de aromáticos y mantener constante la cantidad de resinas y saturados se obtiene un ligero efecto en la reología, disminuyendo de manera mínima la resistencia al cortante.
- Manteniendo constante las resinas y los aromáticos e incrementando los saturados se reduce su dureza.
- Aumentar el contenido de resinas endurece el material, reduce el índice de penetración y la resistencia al corte pero incrementa la viscosidad.

Petersen (2009) describe el efecto que ejerce cada una de las fracciones en las propiedades físicas de los asfaltos, las cuales en combinación determinan el comportamiento de este material: los asfaltenos influyen en la rigidez, interviniendo de manera directa con la viscosidad al aumentar su contenido, la fluidez está definida por los saturados y los aromáticos, las resinas son responsables de la ductilidad, adicionalmente, los saturados y los aromáticos en combinación con los asfaltenos determinan las propiedades del flujo complejo del asfalto.

Respecto a las diferentes fracciones del asfalto, Puello (2013), menciona que los asfaltenos disminuyen la susceptibilidad térmica de la viscosidad, mientras que las resinas la aumentan, no obstante, estas aportan mayor ductilidad y generan una mejor dispersión de los asfaltenos. Los aromáticos se caracterizan por poseer baja susceptibilidad térmica a la viscosidad y baja ductilidad, mientras que la fracción más estable ante la oxidación son los saturados. Adicionalmente, afirma que ante la oxidación las resinas y los aromáticos disminuyen y los asfaltenos aumentan.

Referente a los cambios que experimenta el porcentaje de cada una de las fracciones que componen el asfalto, Puello (2013) estudió asfaltos de Barrancabermeja, Apiay y Boscán, en su estado inicial y envejecido en RTFOT y PAV. En su investigación determina que el contenido de resinas y aromáticos disminuye con el envejecimiento, mientras que los asfaltenos aumentan. Esto concuerda con Siddiqui & Ali (1999), quienes afirman que tras el envejecimiento parte de los aromáticos se convierten en resinas, las cuales posteriormente van a ser transformados en asfaltenos.

Existen diferentes relaciones que se pueden establecer entre las fracciones que componen el asfalto. Romero & Gómez (2002) caracterizaron química y físicamente asfaltos provenientes de la refinería Barrancabermeja y asfaltos del mismo origen recuperados de un pavimento con 5 años de vida útil. En sus resultados encontraron una importante disminución de las relaciones Aromáticos/Saturados y Resinas/Asfaltenos, la cual se fundamenta en la formación de moléculas de mayor tamaño, lo cual es característico del proceso de envejecimiento. (Romero & Gómez, 2002) .

Asociado al análisis de las proporciones de las fracciones SARA se encuentra el Índice de Gaestel o índice de inestabilidad coloidal (IC). Puello (2013) sostiene que “un alto contenido de asfaltenos y saturados afecta la dispersión de los primeros en el ligante asfáltico, debido a la incompatibilidad entre estas dos fracciones, debido a su diferencia de polaridad”. Siddiqui & Ali (1999) encontraron en su investigación que el IC aumenta linealmente con el proceso de envejecimiento. Reyes et al. (2012) afirman que el asfalto apto para para funcionar como pavimento posee valores de índice coloidal inferior a 0,8. A continuación se muestra la ecuación que determina el valor del Índice Coloidal:

$$I_c = \frac{\text{Asfaltenos+Saturados}}{\text{Aromáticos+Resinas}} \quad (1)$$

2.4.2.3. *Espectroscopía Infrarrojo (FTIR)*

Mediante el uso de esta técnica analítica es posible conocer los grupos funcionales que se encuentran presentes en la estructura molecular de un material. Estos grupos son identificados al relacionar el espectro de absorción generado, ante la exposición de radiación infrarroja. (Parra y Cepeda, 2012) “Para absorber radiación infrarroja una molécula debe experimentar un cambio neto en el momento dipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o rotación”, de esta manera el campo eléctrico de la radiación interacciona con la molécula, lo que causa un cambio en la amplitud de la vibración molecular, produciendo la absorción de la radiación. (Afanasieva & Álvarez, 2004)

Los principales grupos funcionales que se forman durante el envejecimiento, son las cetonas y sulfóxidos, además de grupos como los ácidos carboxílicos y anhídrido, estos últimos en una menor proporción. La identificación del grupo carbonilo en el infrarrojo considera a las cetonas, ácidos carboxílicos y a los ácidos carboxílicos anhídridos. (Afanasieva & Álvarez, 2004) En la oxidación del asfalto, las cetonas dominan el grupo funcional carbonilo, por lo que al determinar la concentración de estas genera la información suficiente para establecer una buena estimación de la extensión del envejecimiento. Durante la oxidación el grupo funcional que más rápido se forma es el de los sulfóxidos, no obstante son inestables térmicamente. (Afanasieva & Álvarez, 2004)

“Las cetonas se forman principalmente en el carbono alfa de la cadena alquílica unida a un anillo aromático por abstracción de un hidrógeno por el carbono bencílico durante la oxidación. Los sulfóxidos se forman principalmente por la oxidación de un sulfuro dialquílico o alquil-aril.” (Afanasieva & Álvarez, 2004)

Fernández et al (2014) analizaron asfaltos colombianos mediante la técnica de espectroscopía infrarroja, determinaron cambios en los grupos carbonilos y sulfóxidos, después de aplicar agentes oxidantes. Los grupos carbonilos se identifican en el pico cercano a una longitud de onda de 1650 cm^{-1} , mientras que los sulfóxidos en una longitud de onda de 1050 cm^{-1} .

2.4.3 Modelos Reológicos

Entender las propiedades reológicas del asfalto es importante para estimar el desempeño del pavimento, ya que un pavimento que fluye muy rápidamente puede ser susceptible a que se genere ahuellamiento, mientras que uno muy rígido puede presentar fatiga y agrietamiento. (Yusoff, Shaw, & Airey, 2011) La deformación total del asfalto es definida por el aporte de tres comportamientos: elasticidad instantánea, elasticidad retardada y flujo viscoso. (Liu & You, 2009)

Se han empleado distintos modelos viscoelásticos lineales para estimar sus propiedades reológicas, los cuales son principalmente modelos empíricos, no lineales multivariables y basados en elementos mecánicos. (Yusoff et al, 2011)

Los modelos basados en elementos mecánicos, estiman el comportamiento reológico del asfalto mediante modelos análogos constituidos por resortes lineales y amortiguadores. Los resortes (Ley de Hooke) son elementos elásticos ideales cuya deformación es lineal con la fuerza aplicada, mientras que los amortiguadores (Modelo de Newton) son elementos viscosos ideales, el cual se deforma a una razón proporcional al esfuerzo aplicado. (Yusoff et al., 2011)

El modelo Burger es un modelo basado en elementos mecánicos, el cual está constituido por cuatro componentes mecánicos: dos resortes (E_M , E_K) que siguen la Ley de Hooke y dos amortiguadores (η_M , η_K), que siguen el principio Newtoniano, los cuales se encuentran dispuestos según se presentan en la Figura 3. Los parámetros del Modelo Burger representan las propiedades elásticas (ϵ_e), viscoelásticas (ϵ_v) y de flujo viscoso (ϵ_d), las cuales se determinan mediante el uso de los datos del *creep-recovery*. (Liu & You, 2009) En la ecuación 2 se muestra la ecuación constitutiva asociada al modelo de Burger definida por Liu & You (2009):

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

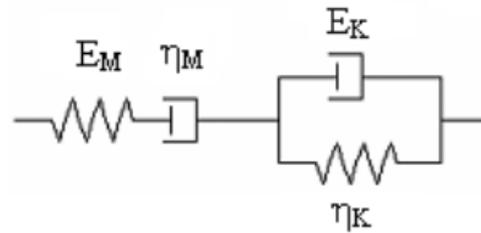


Figura 3: Representación del Modelo Burger

Fuente: Liu & You, 2009

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e + \varepsilon_v + \varepsilon_d = \frac{\sigma_0}{E_M} + \frac{\sigma_0 \cdot t}{\eta_M} + \frac{\sigma_0}{E_K} \left(1 - e^{-\left(\frac{E_K \cdot t}{\eta_K}\right)} \right) \quad (2)$$

En donde $\varepsilon(t)$ es la deformación total, σ_0 es el esfuerzo aplicado, E y η , son los valores asociados a las constantes del resorte y a los amortiguadores, respectivamente. Los subíndices M y K se asocian a los modelos de viscoelásticos de Maxwell (resorte y amortiguador en serie) y Kelvin (resorte y amortiguador en paralelo), respectivamente, dado que el Modelo de Burger se conceptualiza a partir de la combinación de ambos. (Liu & You, 2009). En la siguiente tabla se muestran los valores que Liu & You (2009) determinaron mediante el modelo Burger para un asfalto PG 64-28 a diferentes temperaturas.

Tabla 2: Valores de los parámetros del modelo Burger para un asfalto PG 64-28

Parámetros	Temperatura (°C)			
	40	52	64	70
E_M (Pa)	161.036	35.881	17.477	4.589
η_M (Pa·s)	7.228	973	163	76
E_K (Pa)	583	3.448	576	408
η_K (Pa·s)	31.779	84.026	27.945	28.354

Fuente: Liu & You, 2009.

3. Materiales y Metodología

Los materiales utilizados en esta investigación fueron asfaltos normalizados CA 60/70 y CA 80/100, de la refinería de Barrancabermeja, Colombia. Para el cumplimiento de los objetivos se desarrollaron dos etapas generales, la primera consistió en la aplicación de procesos de envejecimiento al asfalto y, la segunda, se desarrolló mediante la caracterización química y reológica de los asfaltos envejecidos.

3.1 Envejecimiento del Asfalto

Ambos tipos de asfaltos fueron envejecidos para simular en envejecimiento a corto plazo (RTFOT), el cual es asociado a la producción de la mezcla y el proceso de construcción de la capa asfáltica. El envejecimiento a corto plazo se efectuó bajo los estándares de la Norma AASHTO T240, con el equipo de marca James Cox & Sons Inc., modelo CS 325-B, propiedad de la Pontificia Universidad Javeriana. El porcentaje de pérdida de masa para el asfalto 60/70 fue de 0,497% y 0,512%, mientras que para el asfalto 80/100 este porcentaje disminuyó ligeramente, con valores de 0,401% y 0,421%.

Posterior al envejecimiento a corto plazo, se procedió al envejecimiento del asfalto mediante la exposición de radiación ultravioleta, aplicada por medio de una cámara de envejecimiento desarrollada por la Pontificia Universidad Javeriana. La cámara fue creada bajo los lineamientos de la Norma ASTM D4799-08, posee ocho lámparas que emiten radiación con una longitud de onda de 340 nm, la cual se encuentra en el rango de la radiación UVA. La distancia perpendicular entre las lámparas y la parte central de la superficie sobre la que se coloca el asfalto es de 22 cm.

Fernández et al (2014) establecieron una relación entre la radiación emitida por la cámara de envejecimiento y la radiación por día recibida en Bogotá, Colombia, en la que 500 h de radiación UVA emitida por la cámara simulan un año de radiación solar en Bogotá. Por lo que 100 y 200 horas de radiación UVA, simulan, aproximadamente, 73 y 146 días de

radiación solar en Bogotá. La relación presentada por Fernández et al (2014), corresponde a periodos de radiación y condensación consecutivos, de dos horas cada uno, a una temperatura de 60 °C y una humedad relativa del 99%.

Los periodos de exposición a la radiación UV que se aplicaron oscilan entre las 100 y las 200 h de exposición, con intervalos de 25 h (100, 125, 150, 175 y 200 h). Para el envejecimiento ante la radiación UVA se dispuso el asfalto en bandejas metálicas de 10 cm por 30 cm, con un espesor de 2 mm, Para simular la radiación a la que es sometido el asfalto colocado en sitio, se programó la cámara con periodos continuos de radiación y condensación de dos horas cada uno, a una temperatura de 60 °C y una humedad relativa del 99%. Cada ciclo (radiación-condensación) simula el envejecimiento que la radiación ejerce en el día y la noche.

En total se trabajó con 7 muestras para cada tipo de asfalto (60/70 y 80/100): asfalto original, envejecido únicamente a corto plazo (RTFOT), envejecido por RTFOT y cinco periodos de radiación UVA, para un total de 14 muestras. En la Tabla 3 se muestra una a manera resumen los tipos de materiales con los que se trabajaron. Para efectos de la nomenclatura utilizada, en este documento se utilizará como referencia únicamente las horas a las que fue expuesto ante la radiación ultravioleta del tipo A, es decir, el asfalto envejecido a corto plazo y ante 100 h de exposición UVA, será mencionado como asfalto con 100 h UV.

Tabla 3: Materiales utilizados

Tratamiento de envejecimiento aplicado	Tipo de asfalto	
	60/70	80/100
Sin proceso	Original	Original
RTFOT (corto plazo)	RTFOT	RTFOT
RTFOT+100 h UV	100 h UV	100 h UV
RTFOT+125 h UV	125 h UV	125 h UV
RTFOT+150 h UV	150 h UV	150 h UV
RTFOT+175 h UV	175 h UV	175 h UV
RTFOT+200 h UV	200 h UV	200 h UV

3.2 Caracterización del Asfalto

La caracterización del asfalto se realizó mediante la evaluación de las propiedades reológicas y químicas. La caracterización química del asfalto se ejecutó mediante el uso de la técnica de: espectroscopía infrarroja, la cromatografía S.A.R.A y el ensayo de análisis elemental. Para las propiedades reológicas, se ejecutaron pruebas con el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), específicamente su caracterización del Grado de Desempeño “PG”, el barrido lineal de frecuencias, creep repetitivo, el *multi-stress* (MSCR, por sus siglas en inglés) y la viscosidad absoluta a 60 °C.

La cromatografía líquida de capa fina fue realizada para determinar las fracciones de saturados (S), aromáticos (A), resinas (R) y asfaltenos (A) con el equipo Iatroscan MK-6 Mitsubishi Kagaku de Thomas Scientific, propiedad del LanammeUCR en Costa Rica. Para la ejecución del ensayo se realizó la separación de las fracciones utilizando hexano, tolueno y una disolución de 95% tolueno y 5% de metanol.

Para analizar cambios en los grupos funcionales carbonilos (C=O) y sulfóxidos (S=O) del asfalto se hizo uso de la técnica de espectroscopía infrarroja utilizando el equipo Nicolet iS50 FT-IR, de la compañía Thermo Cientific, propiedad del LanammeUCR. El análisis elemental de los materiales para determinar el contenido porcentual de nitrógeno, carbono, hidrógeno, azufre y oxígeno se realizó con el uso del analizador elemental CHNSO, Marca THERMO referencia Flash 2000, propiedad de la Universidad Distrital.

Los ensayos realizados para la caracterización reológica fueron se ejecutaron con el reómetro de corte dinámico (DSR, por sus siglas en inglés) AR 2000ex de TA Instrument, propiedad de la Pontificia Universidad Javeriana. El ensayo de Grado de Desempeño “PG”, el Multi-Stress y el barrido lineal de frecuencias se ejecutaron siguiendo las normas AASHTO MP 19-10, TP 70-12 y TP-101-12-UL, respectivamente, mientras que el Creep Repetitivo se realizó según el reporte NCHRP 459 y la viscosidad absoluta conforme a la norma ASTM D 2171.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización Química

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los diferentes ensayos que permitieron caracterizar químicamente el asfalto, tales como la cromatografía SARA, espectroscopía infrarroja y partículas elementales. La información que se presenta en gráficos en esta sección, se muestra en tabulada en la sección de anexos.

4.1.1 Cromatografía SARA

Mediante la ejecución del ensayo de cromatografía SARA fue posible determinar las fracciones que compone el asfalto, así como diferentes relaciones que se establecen entre estas, como es el caso del Índice Coloidal. En la Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7 se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los rangos de envejecimiento en estudio. Los resultados que se muestran se obtuvieron partir de al menos ocho registros que cuantifican el porcentaje asociado a cada fracción, además las barras de error se muestran considerando una desviación estándar.

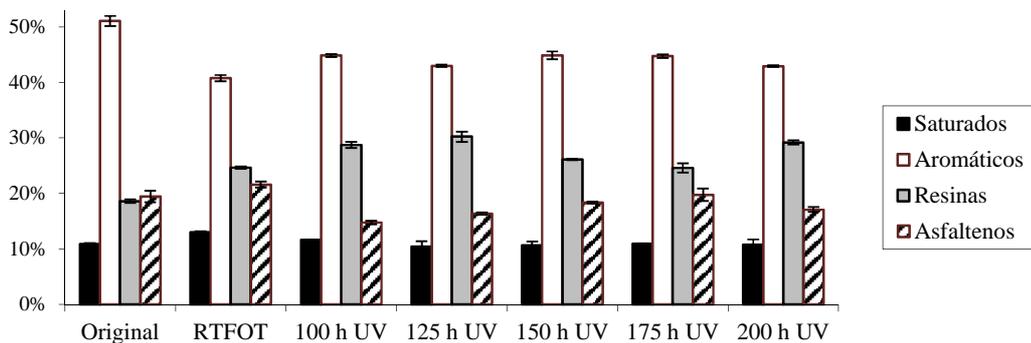


Figura 4: Fracciones SARA, asfalto 60/70

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

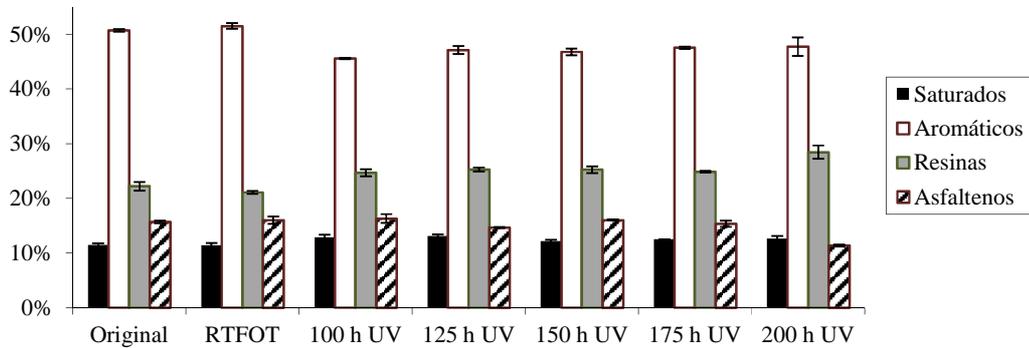


Figura 5: Fracciones SARA, asfalto 80/100

Respecto a los resultados obtenidos se observa que los aromáticos disminuyen al envejecer el asfalto a corto plazo (RTFOT) para el asfalto 60/70, mientras que para el asfalto 80/100 la disminución importante de los aromáticos se presenta entre el envejecimiento a corto plazo y las 100 h UV, lo cual concuerda con los hallazgos obtenidos por Puello (2013), Siddiqui & Ali (1999) y Reyes et al. (2012), quienes argumentan que los aromáticos disminuyen ante procesos de envejecimiento. No obstante, durante los diferentes periodos de exposición a la radiación UV permanecen, básicamente, constantes.

Los saturados se mantienen prácticamente constantes para ambos tipos de asfalto analizados, lo cual concuerda con la afirmación de saturados Petersen (2009), quien relaciona su estabilidad con la baja reactividad química de esta fracción, la cual, además es altamente resistente a la oxidación generada por la exposición ambiental.

Para el asfalto 60/70 El porcentaje de resinas es el que presenta mayor inestabilidad ante el envejecimiento UV: tendencia al aumento al ser envejecido hasta las 125 h UV, disminuyendo hasta las 175 h UV y aumentando de nuevo a las 200 h UV. Mientras que para el asfalto 80/100 las resinas muestran una ligera tendencia a aumentar ante la exposición a la radiación UV.

En cuanto a los asfaltenos, en ambos tipos de asfalto, se observa un ligero incremento entre el asfalto original y el envejecido en RTFOT, lo cual concuerda con los resultados reportados

por distintos autores, tales como Puello (2013), Siddiqui & Ali (1999) y Reyes et al. (2012). No obstante, para el asfalto expuesto ante la radiación UV el comportamiento para ambos materiales es distinto, para el asfalto 60/70 se presenta una disminución considerable a las 100 h UV y posteriormente se presenta un aumento paulatino de esta fracción, mientras que para el asfalto 80/100 se evidencian ligeros cambios con el envejecimiento y sin una tendencia marcada.

Tanto Puello (2013) y como Siddiqui & Ali, (1999) afirman que el envejecimiento del asfalto causa transformaciones en los compuestos que conforman las diferentes fracciones, lo que ocasiona que se disminuya el porcentaje de aromáticos, se aumenten las resinas, para posteriormente disminuir el porcentaje de resinas y aumentar el contenido porcentual de asfaltenos. Este comportamiento no se evidencia de manera clara al aumentar el envejecimiento del asfalto, sin embargo, al correlacionar el porcentaje de las diferentes fracciones que poseen los diferentes niveles de envejecimiento para ambos asfaltos, es posible identificar que las resinas aumentan al disminuir los aromáticos, así como los asfaltenos aumentan al disminuir las resinas.

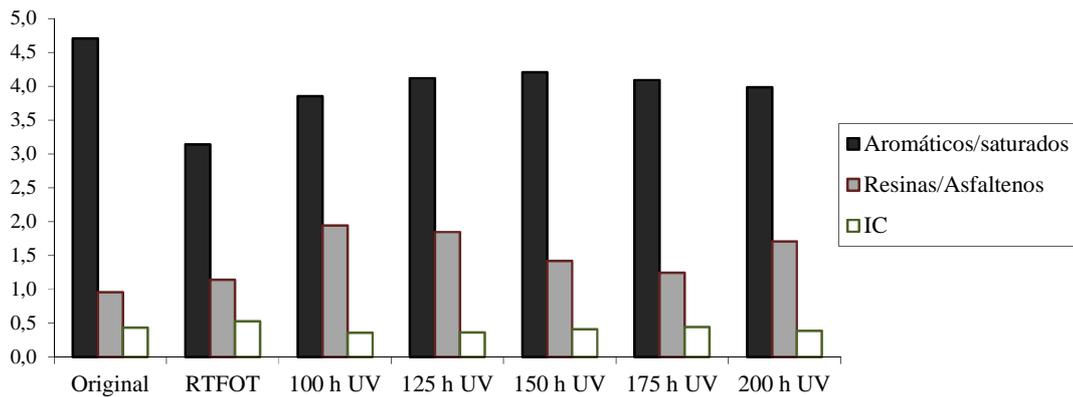


Figura 6: Relaciones entre las fracciones SARA, asfalto 60/70

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

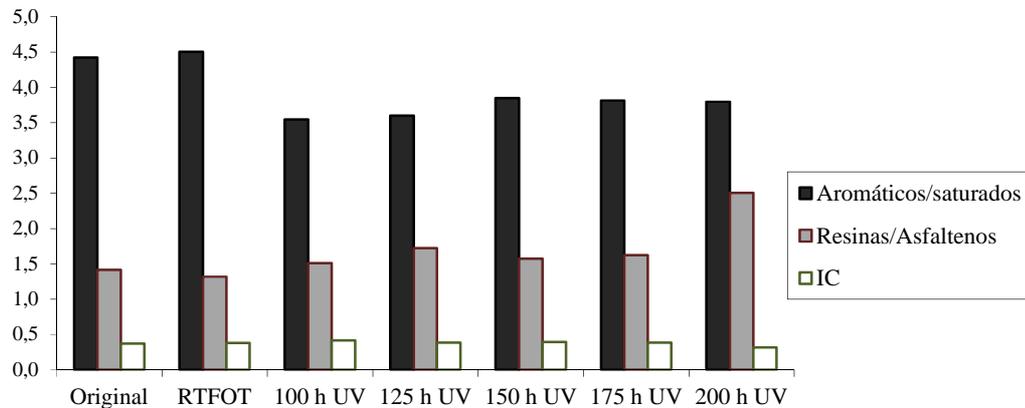


Figura 7: Relaciones entre las fracciones SARA, asfalto 80/100

En cuanto a las relaciones presentadas en las Figura 6 y Figura 7, Romero & Gómez (2002) afirman que ante el envejecimiento las relaciones Aromáticos(A)/Saturados(S) y Resinas(R)/Asfaltenos(As) disminuyen, esto para asfaltos colombianos envejecidos, lo cual, en general, no concuerda con los resultados obtenidos. La relación A/S mantiene la tendencia del asfalto de estado original a envejecido con RTFOT, posteriormente aumenta paulatinamente hasta las 150 h UV en donde comienza a disminuir nuevamente, para ambos tipos de asfaltos, siendo más marcado en el asfalto 60/70. Además para la relación R/As, se observa un aumento paulatino hasta las 100 h UV, para luego disminuir gradualmente hasta las 175 h UV en donde comienza a aumentar de nuevo, para ambos asfaltos.

Puello (2013) y Reyes et al (2012) determinaron que el índice coloidal (IC) para asfaltos colombianos aumenta conforme aumenta el envejecimiento del asfalto. Para el asfalto 60/70: se presenta un leve aumento del asfalto original al envejecido con RTFOT, no obstante disminuye de manera importante a las 100 h UV para mantenerse casi constante para las demás exposiciones UV, lo que contrasta con el asfalto 80/100 para el cual no se presentan cambios significativos.

4.1.2 Espectroscopía FTIR

Mediante esta técnica es posible analizar el cambio en la oxidación del asfalto mediante el análisis de los grupos funcionales Carboxilos (C=O) y Sulfóxidos (S=O), ya que un aumento de estos grupos implica oxidación y por lo tanto envejecimiento del asfalto (Petersen, 2009). En las siguientes figuras se presentan los espectros obtenidos, cabe destacar que la presencia del grupo carboxilo se observa cercana al número de onda de 1650 cm^{-1} , mientras que los sulfóxidos se encuentran alrededor del número de onda de 1050 cm^{-1} . (Fernández et al., 2014)

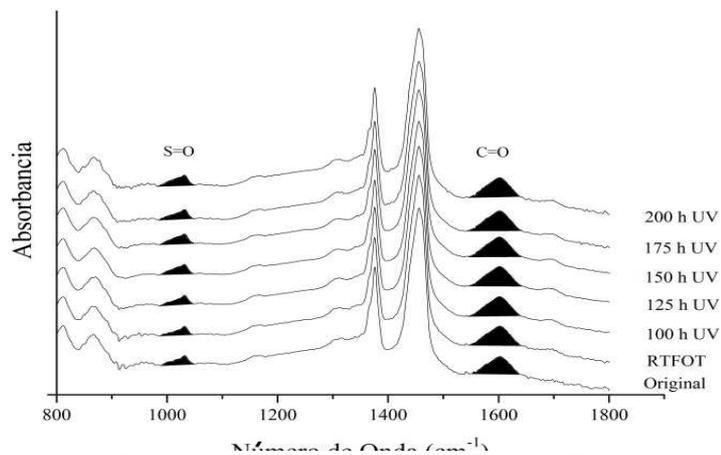


Figura 8: Espectro FTIR del asfalto 60/70

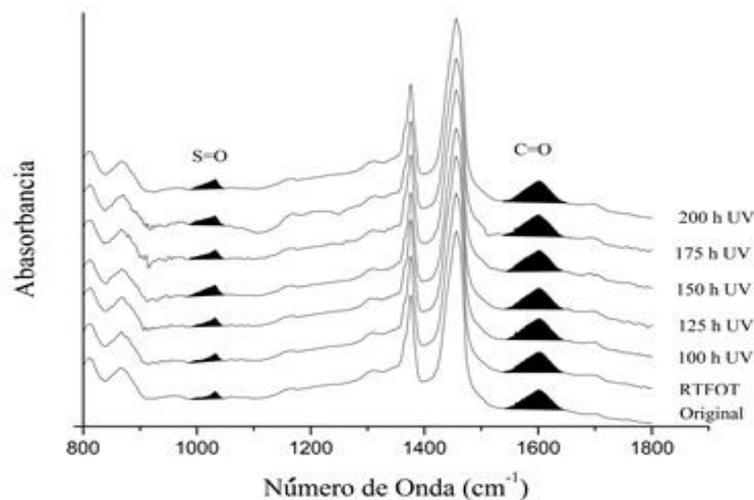


Figura 9: Espectro FTIR del asfalto 80/100

A partir de los espectros generados por el espectrómetro infrarrojo se obtiene el área asociada a cada tipo de asfalto analizado (remarcada en color negro en la Figura 8 y Figura 9), correspondiente a los grupos funcionales S=O y C=O, un incremento en estos valores se asocia a la oxidación del material, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos para ambos grupos funcionales. Relacionado con esto Fernández et al (2014) mencionan que la radiación UV genera un aumento del contenido de grupos funcionales con la oxidación, ya que posee la capacidad de generar radicales libres, los cuales reaccionan con el oxígeno del ambiente, causando la formación de oxidantes fuertes y grupos oxigenados, tales como las cetonas, ácidos carboxílicos y los anhídridos

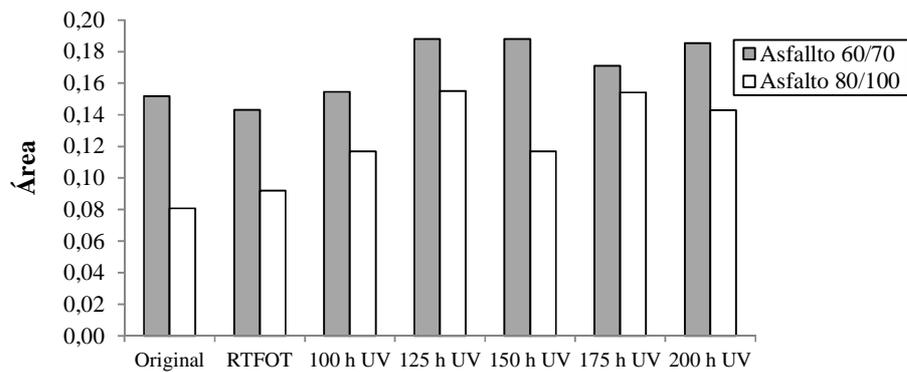


Figura 10: Área de sulfóxido (S=O) asociado a cada tipo de asfalto.

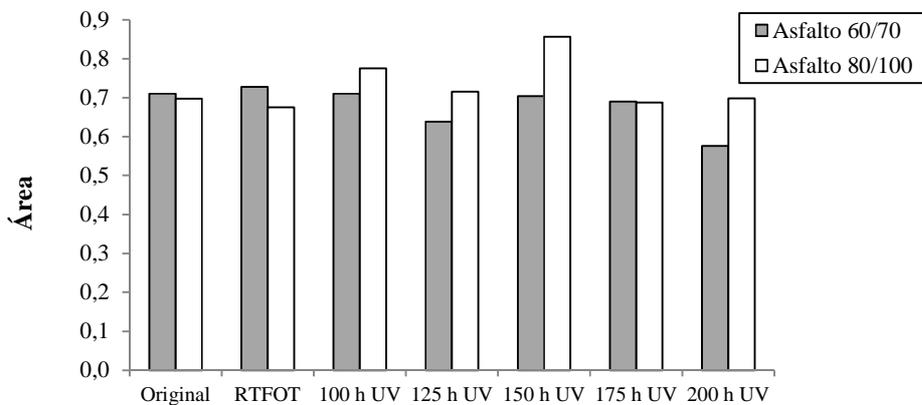


Figura 11: Área de carbonilo (C=O) asociado a cada tipo de asfalto.

A partir de la Figura 10 y Figura 11, es posible afirmar que los sulfóxidos presentan mayor variabilidad que los carbonilos, exceptuando el asfalto sometido a 150 h UV del asfalto 80/100, la cual es la tendencia esperada tras procesos de oxidación. En el caso de los sulfóxidos se observa una tendencia al aumento hasta las 150 h UV para el asfalto 60/70 y hasta las 125 h UV para el asfalto 80/100, sin presentar una tendencia clara después de estos periodos de exposición a la radiación UV.

La tendencia al aumento del grupo funcional S=O hasta las 125 h UV, se encuentra acorde a la afirmación que tanto Afanasieva & Álvarez (2004) y Reyes et al. (2012) sostienen respecto al aumento de la oxidación del asfalto debido al envejecimiento. No obstante, se observa una disminución importante a las 150 h para el asfalto 80/100 y a las 175 h para el asfalto 60/70.

Por otro lado, la alta variabilidad de los sulfóxidos con respecto a los carbonilos, se puede justificar dado que, según Afanasieva & Álvarez (2004), los sulfóxidos son los grupos funcionales que se forman con mayor rapidez, pero son térmicamente inestables. Al ser inestables térmicamente, la exposición al calor en el que se someten los asfaltos en la cámara de radiación (60 °C), podrían causar rompimiento de enlaces S=O, generando la liberación de dióxido de azufre (SO₂). Lo cual concuerda con Petersen (2009), quien afirma que se da la pérdida de sulfóxidos a través de la descomposición térmica, lo cual depende de la temperatura de envejecimiento (determina la velocidad de descomposición) y la tasa de difusión del oxígeno en el asfalto (controlada por el espesor de la muestra).

4.1.3 Análisis Elemental

Este ensayo se enfoca en determinar el porcentaje de partículas elementales que componen el asfalto, tales como el oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S). En la siguiente tabla se presentan los valores porcentuales de cada uno de estos elementos, además en la Figura 12 se muestran los resultados obtenidos de manera gráfica,

específicamente para el oxígeno, debido a la relación que tiene este con la oxidación del asfalto.

Tabla 4: Contenido porcentual de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre

Tratamiento de envejecimiento	Asfalto 60/70				Asfalto 80/100			
	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)
Original	0,71	84,17	10,11	2,92	0,70	83,96	10,19	2,95
RTFOT	0,71	83,10	9,94	3,91	0,70	83,91	10,17	2,87
100 h UV	0,71	84,08	10,07	2,68	0,73	83,77	10,11	2,87
125 h UV	-	-	-	-	0,71	83,54	10,13	3,03
150 h UV	0,69	83,93	10,02	2,96	0,73	83,18	10,08	2,97
175 h UV	0,71	83,42	9,98	2,29	0,73	83,75	10,18	2,53
200 h UV	0,72	84,34	10,01	2,37	0,73	84,16	10,25	2,48

Los porcentajes obtenidos para cada uno de los elementos analizados se encuentran entre los valores esperados, según lo reportado por Afanasieva & Álvarez (2004), quienes afirman que la mayor parte del asfalto está constituido por el carbono, entre el 80-85%, seguido por el hidrógeno con un porcentaje entre el 9 y el 11%, además se presentan proporciones de otros elementos, tales como el azufre (0-7%) y nitrógeno (0-3%), no obstante, se observa que el porcentaje de oxígeno del asfalto analizado supera el rango establecido como habitual (0-2%), por lo que el material en estudio puede ser considerado alto en oxígeno.

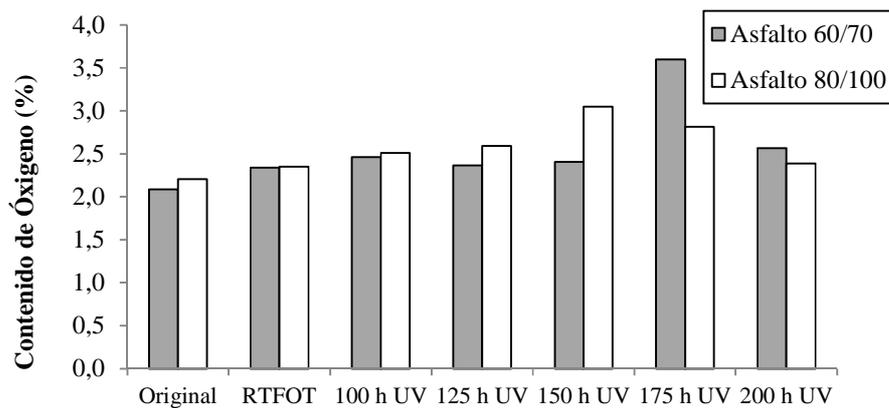


Figura 12: Contenido porcentual de oxígeno

Los resultados anteriores consideran los porcentajes en peso de los principales elementos que componen el asfalto, no obstante, una manera representativa de analizar los resultados es mediante el contenido molecular de cada asfalto, lo cual se muestra en la siguiente tabla. En la que se puede apreciar que el contenido molecular que presenta mayor variabilidad molecular en términos porcentuales, es el oxígeno.

Tabla 5: Contenido molecular de cada tipo de asfalto, normalizado con respecto al carbono.

Tratamiento de envejecimiento	Asfalto 60/70					Asfalto 80/100				
	O	N	C	H	S	O	N	C	H	S
Original	13,0	5,1	701,4	1010,5	9,1	13,8	5,0	699,6	1018,6	9,2
RTFOT	14,6	5,1	692,5	993,8	12,2	14,7	5,0	699,3	1016,7	8,9
100 h UV	15,4	5,1	700,7	1006,8	8,4	15,7	5,2	698,1	1011,4	9,0
125 h UV	-	-	-	-	-	16,2	5,1	696,1	1013,0	9,4
150 h UV	15,0	4,9	699,4	1002,0	9,2	19,1	5,2	693,1	1007,6	9,3
175 h UV	22,5	5,1	695,2	998,0	7,1	17,6	5,2	697,9	1017,5	7,9
200 h UV	16,1	5,1	702,8	1000,7	7,4	14,9	5,2	701,3	1024,5	7,7

Dado que un factor que influye considerablemente en el envejecimiento de un asfalto es la oxidación de sus componentes (debido a su reacción con el oxígeno de la atmósfera), proceso que genera cambios en su estructura molecular (Bell, 1989), se esperaría que ante procesos de envejecimiento (RTFOT y exposición a la radiación UV) se presente un aumento paulatino del porcentaje de oxígeno, y por consiguiente su rigidización, sin embargo, no se presenta una tendencia definida al respecto. Para el asfalto 60/70 se observa un comportamiento cierta estabilidad del contenido porcentual del oxígeno, exceptuando al asfalto sometido a 175 h UV, el cual presenta un aumento considerable, para luego disminuir de manera importante a las 200 h UV. Para el asfalto 80/100 se observa un aumento paulatino del oxígeno, alcanzando su porcentaje máximo a las 150 h UV, para después presentar una tendencia a la disminución.

4.2 Caracterización Reológica

La caracterización reológica del material analizado se enfocó en identificar cambios en el comportamiento del material, en términos de flujo y deformación, ante los procesos de envejecimiento al que es sometido el asfalto: RTFOT y exposición ante la radiación ultravioleta.

4.2.1 Grado de Desempeño

En la Figura 13 y Figura 14 se muestran los resultados obtenidos de la relación del módulo complejo (G^*) con respecto al seno del ángulo de fase (δ) para diferentes temperaturas, a partir de esto es posible afirmar que al asfalto 60/70 clasifica como PG-64, mientras que el asfalto 80/100 corresponde a un PG-58. Lo que es de esperar, ya que el asfalto 60/70 es más rígido que el 80/100 (por definición de la clasificación por penetración), por lo que para llegar a una misma deformación manteniendo la magnitud del esfuerzo constante, el asfalto 60/70 es capaz de soportar una mayor temperatura. Los resultados presentados gráficamente se obtuvieron a partir de los valores obtenidos tras ejecutar por duplicado el ensayo, cada uno de ellos con 10 mediciones, además para las líneas de dispersión se considera una desviación estándar. Los valores utilizados para las gráficas se encuentran tabulados en los anexos.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

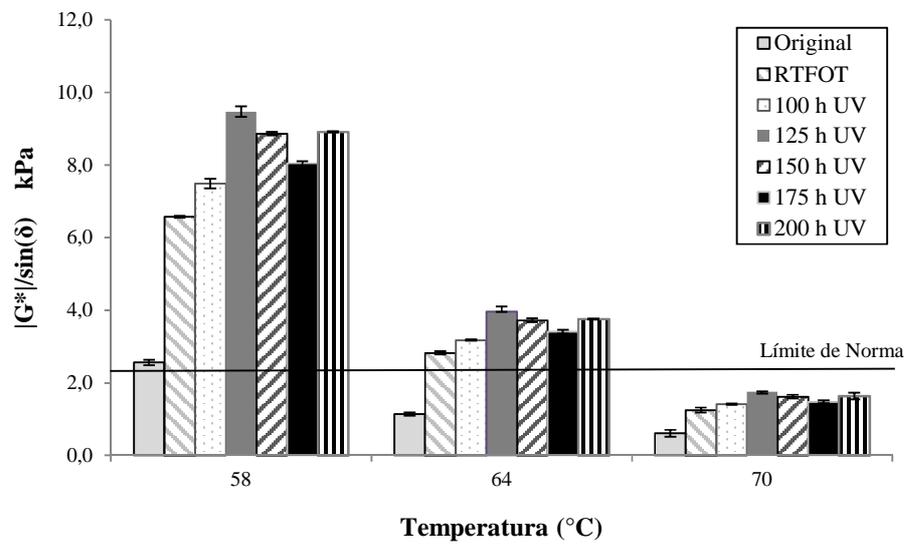


Figura 13: Relación $|G^*/\sin(\delta)|$ para diferentes temperaturas, asfalto 60/70

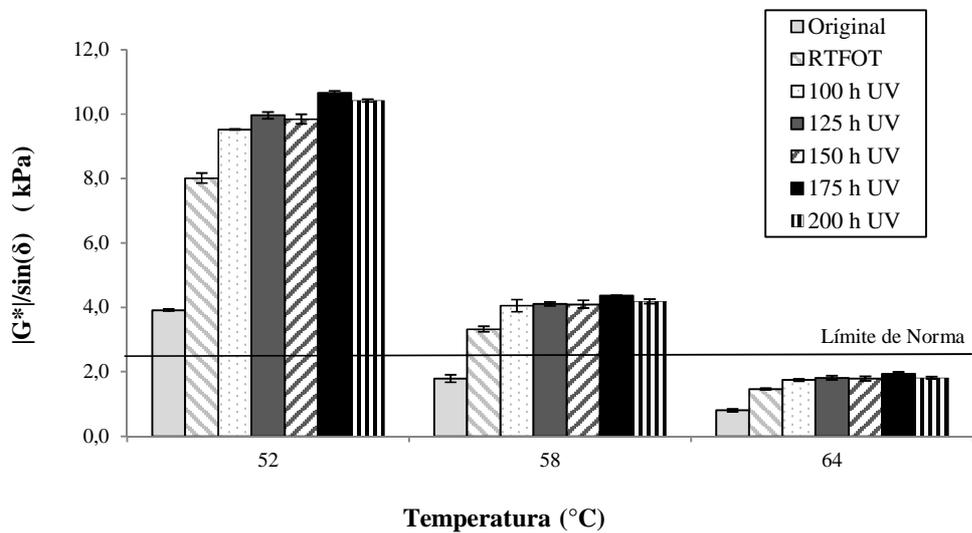


Figura 14: Relación $|G^*/\sin(\delta)|$ para diferentes temperaturas, asfalto 80/100

A continuación se presenta el valor del módulo complejo y del ángulo de fase para los diferentes materiales ensayados, cabe destacar que los resultados que se muestran corresponden a la temperatura a la que cada uno de los asfaltos clasifican según su grado de desempeño, es decir, a los 64 °C y 58 °C, para el asfalto 60/70 y 80/100, respectivamente.

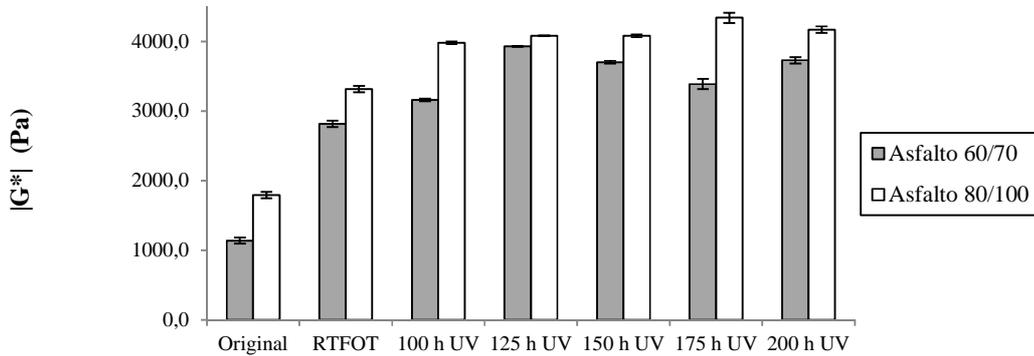


Figura 15: Valor del Módulo Complejo (G*)

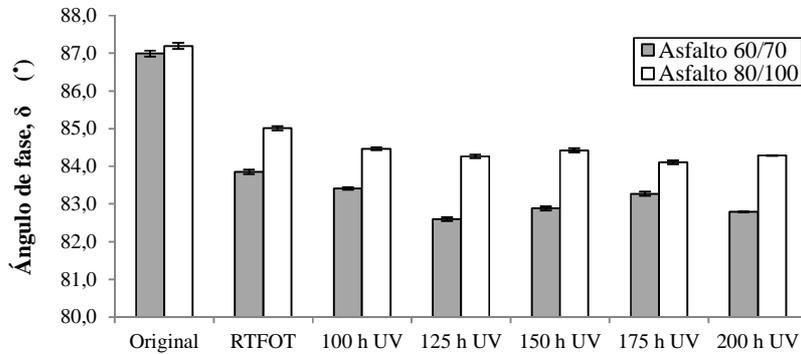


Figura 16: Valor del Ángulo de fase (δ)

No fue posible realizar los ensayos correspondientes a la temperatura baja para la clasificación por grado de desempeño, ya que no se contaba con asfalto envejecido con PAV, ya que según Fernández et al (2014) el efecto provocado por el envejecimiento a largo plazo (PAV) es similar a 500 h de radiación UV, rango que se encuentra fuera del rango de estudio

de esta investigación, además no se cuenta con el reómetro de flexión de viga (Bending Beam Rheometer, BBC), equipo necesario para determinar el PG a la temperatura baja.

El asfalto tiende a rigidizarse ante el envejecimiento (Rondón et al,2010), por lo que se esperaría que al aumentar el tiempo de exposición ante la radiación UV, el módulo complejo aumente mientras que el ángulo de fase disminuye, por el aumento de la componente elástica. No obstante, para el asfalto 60/70 se observa esta tendencia hasta las 125 h UV, posteriormente entre las 150 h UV y las 175 h UV disminuye, para luego continuar aumentando a las 200 h UV; en cuanto al ángulo de fase también se presenta una singularidad respecto al comportamiento esperado, específicamente entre las 150 y 175 h UV. En el asfalto 80/100 se observa el comportamiento esperado, según lo reportado en la literatura, tanto para el valor del módulo como para el ángulo de fase, hasta las 100 h UV, a partir de este periodo la magnitud de estos parámetros se mantienen prácticamente constantes.

A partir de los resultados obtenidos, es posible afirmar que el asfalto 60/70 presenta una recuperación del módulo complejo y del ángulo de fase durante las 150 y 175 h UV, alcanzando su máxima recuperación a las 175 h UV (recuperación del 13,8% para el valor del módulo complejo) con respecto a las 125 h UV. En el asfalto 80/100 no es posible afirmar que se presenta una recuperación, sin embargo, su comportamiento se mantiene básicamente estable a partir de las 100 h UV.

4.2.2 Viscosidad Absoluta (60 °C)

Los distintos parámetros reportados al ejecutar el ensayo de viscosidad absoluta en el asfalto en estudio se presentan en las siguientes tres figuras, entre ellos se tiene el valor de la viscosidad, así como el módulo complejo y el ángulo de fase a 60 °C. Los resultados presentados gráficamente se obtuvieron a partir de los valores obtenidos tras ejecutar por duplicado el ensayo, cada uno de ellos con 10 mediciones, además para las líneas de dispersión se considera una desviación estándar. Los valores utilizados para las gráficas se encuentran tabulados en los anexos.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

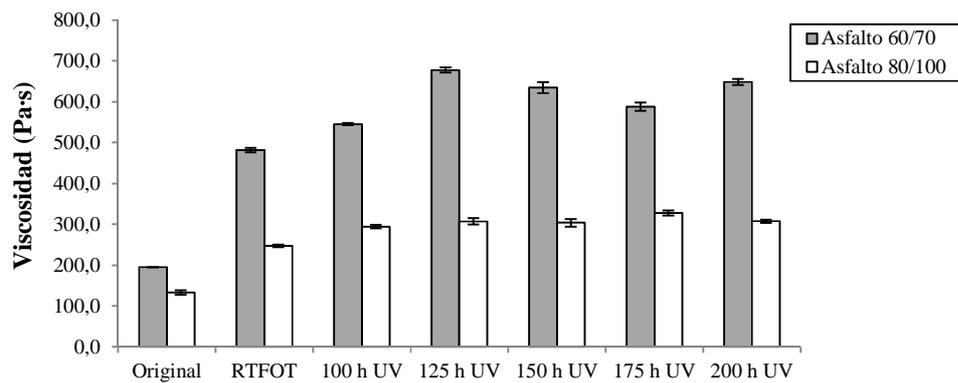


Figura 17: Viscosidad del asfalto a 60 °C.

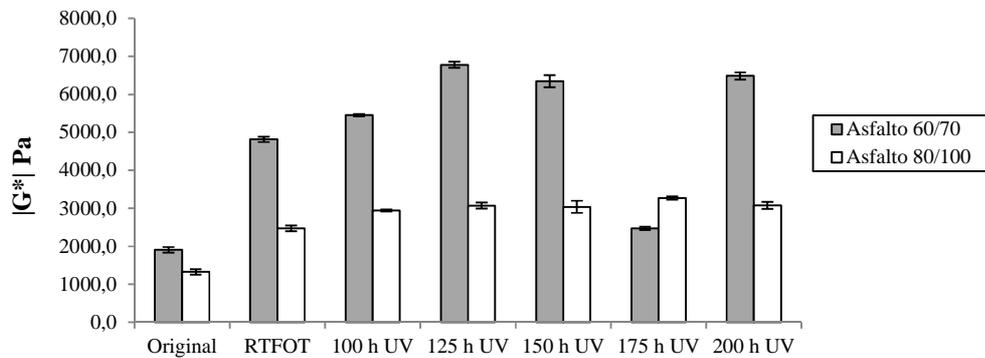


Figura 18: Valor del Módulo Complejo (G*) a 60 °C

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

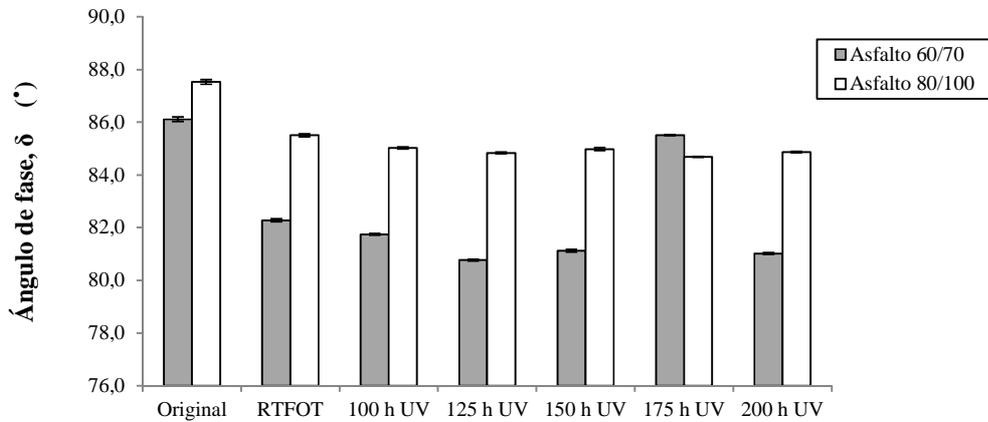


Figura 19: Valor del Ángulo de fase (δ) a 60 °C

La viscosidad absoluta refleja una ligera recuperación entre las 150 y 175 h UV para el asfalto 60/70. Por otro lado el 80/100 se mantiene prácticamente estable para los asfaltos sometidos a la radiación ultravioleta. No obstante, la recuperación del asfalto 60/70 se presenta de manera importante, presentando un módulo complejo para las 175 h UV, inclusive menor que el que presenta el asfalto envejecido únicamente en RTFOT, esta recuperación se observa también en la magnitud del ángulo de fase para las 175 h UV, igualando, prácticamente el valor del asfalto original. Para el asfalto 80/100 se mantienen, prácticamente constante, tanto el módulo como el ángulo de fase, a partir de las 100 h UV.

4.2.3 Multi-Stress (MSCR)

El “Multi Stress Creep Recovery” permite cuantificar la respuesta elástica del asfalto ante ciclos de carga y descarga, al aplicar esfuerzos con una magnitud de 100 Pa y 3200 Pa. En la Figura 20 y Figura 21 se muestra el porcentaje de deformación que presenta el material durante la ejecución del ensayo.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

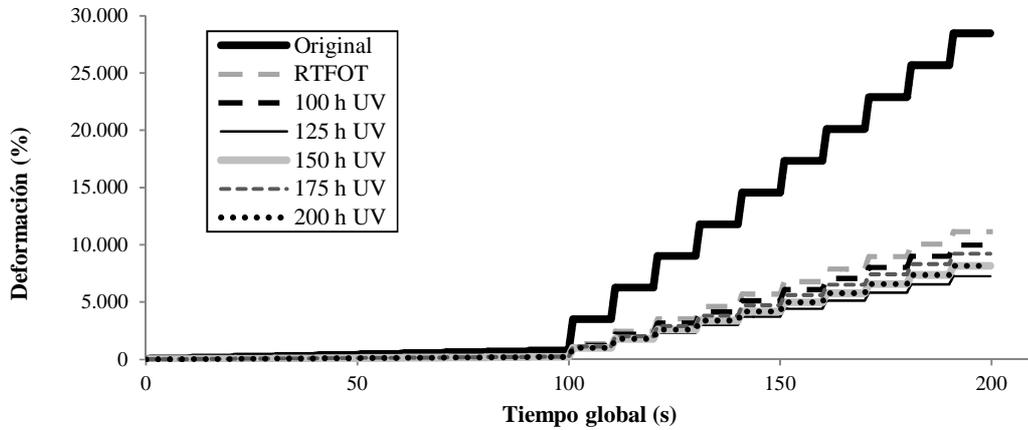


Figura 20: Deformación contra tiempo de ejecución del ensayo MSCR a 64 °C, asfalto 60/70

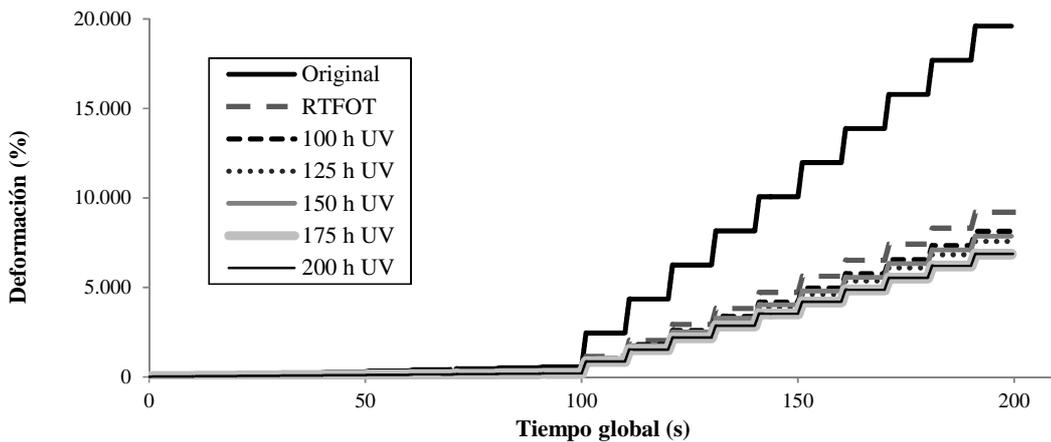


Figura 21: Deformación contra tiempo de ejecución del ensayo MSCR a 58 °C, asfalto 80/100

Dado que el proceso de envejecimiento genera endurecimiento en el asfalto (Bell, 1989), se esperaría que conforme aumente el periodo de exposición a la radiación, el asfalto se rigidice y por lo tanto la deformación que presenta el material por cada ciclo de carga debe ser menor. Para el asfalto 60/70 se presenta la tendencia esperada hasta las 125 h UV, después se da una recuperación paulatina hasta llegar a la máxima recuperación a las 175 h UV, para después

volver al proceso de rigidización a las 200 h UV. Para el asfalto 80/100 se presenta un comportamiento similar al que se presentó en el asfalto 60/70, no obstante la recuperación no es tan marcada y se presenta únicamente para las 150 h UV.

Se determinó la deformación permanente “*nonrecoverable creep compliance*” (J_{NR}) para ambas magnitudes de esfuerzo aplicadas, los cuales son asociados a cargas de tránsito que pueden ser soportada por el asfalto, para alcanzar una deformación admisible. Según la norma AASHTO TP70-07, un $J_{NR 3,2}$ menor a cuatro se asocia a un tránsito estándar, lo que corresponde a menos de 10 millones de ESALs. Además, se calculó la capacidad de recuperación a 100 Pa ($R_{0,1}$) y 3200 Pa ($R_{3,2}$). Estos datos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros J_{NR} y capacidad de recuperación (% R), según el ensayo MSCR

Nivel de envejecimiento	Asfalto 60/70					Asfalto 80/100				
	R _{0,1}	J _{NR 0,1}	R _{3,2}	J _{NR 3,2}	Tránsito	R _{0,1}	J _{NR 0,1}	R _{3,2}	J _{NR 3,2}	Tránsito
Original	1,46%	7,85	0,23%	8,65	-	1,51%	5,57	0,27%	5,95	-
RTFOT	4,78%	3,02	1,13%	3,39	Estándar	5,93%	2,51	1,00%	2,76	Estándar
100 h UV	4,95%	2,73	1,33%	3,04	Estándar	4,41%	2,27	1,27%	2,47	Estándar
125 h UV	6,69%	1,99	2,16%	2,21	Estándar	4,35%	2,13	1,38%	2,30	Estándar
150 h UV	6,44%	2,20	1,75%	2,49	Estándar	5,00%	2,18	1,34%	2,39	Estándar
175 h UV	5,27%	2,52	1,48%	2,81	Estándar	5,13%	1,91	1,64%	2,08	Estándar
200 h UV	6,28%	2,22	1,71%	2,48	Estándar	5,09%	1,92	1,51%	2,09	Estándar

De la Tabla 6 se observa la recuperación del asfalto, a la que se hace referencia de la Figura 20 y Figura 21, ya que la capacidad de la deformación (% R) para cada ciclo de carga y descarga debería incrementarse con el envejecimiento, mientras que el JNR debería disminuir, no obstante, para el asfalto 60/70 se presenta una recuperación importante entre las 150 y 175 h UV, mientras que para el 80/100 se presenta una ligera recuperación a las 150 h UV.

4.2.3.1 Modelo Burger

Para aplicar el modelo viscoelástico de Burger, se hizo uso del ciclo de carga y de descarga en el que se presenta una deformación del 10%. Para ambos asfaltos, 60/70 y 80/100 se presentó durante el primer ciclo, con un esfuerzo aplicado de 100 Pa. En la Figura 22 y Figura 23 se presenta la deformación medida por el DSR para cada muestra ensayada y la deformación calculada con el modelo, los cuales se identifican con una (m) y una (c), respectivamente.

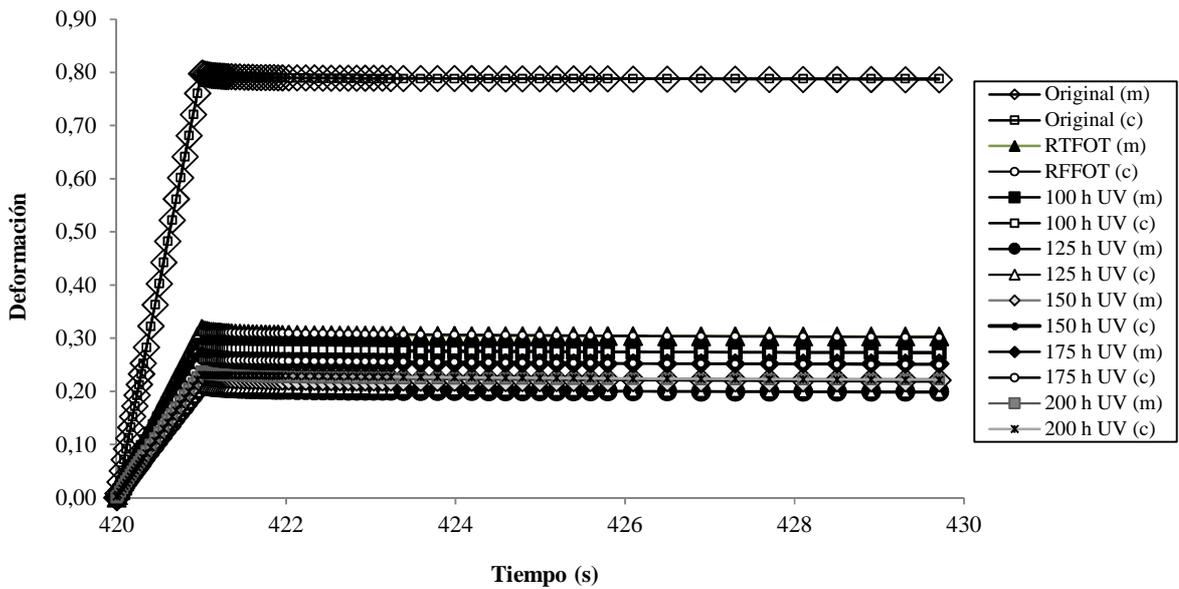


Figura 22: Deformación medida (m) y calculada (c) con el Modelo Burger, para el asfalto 60/70

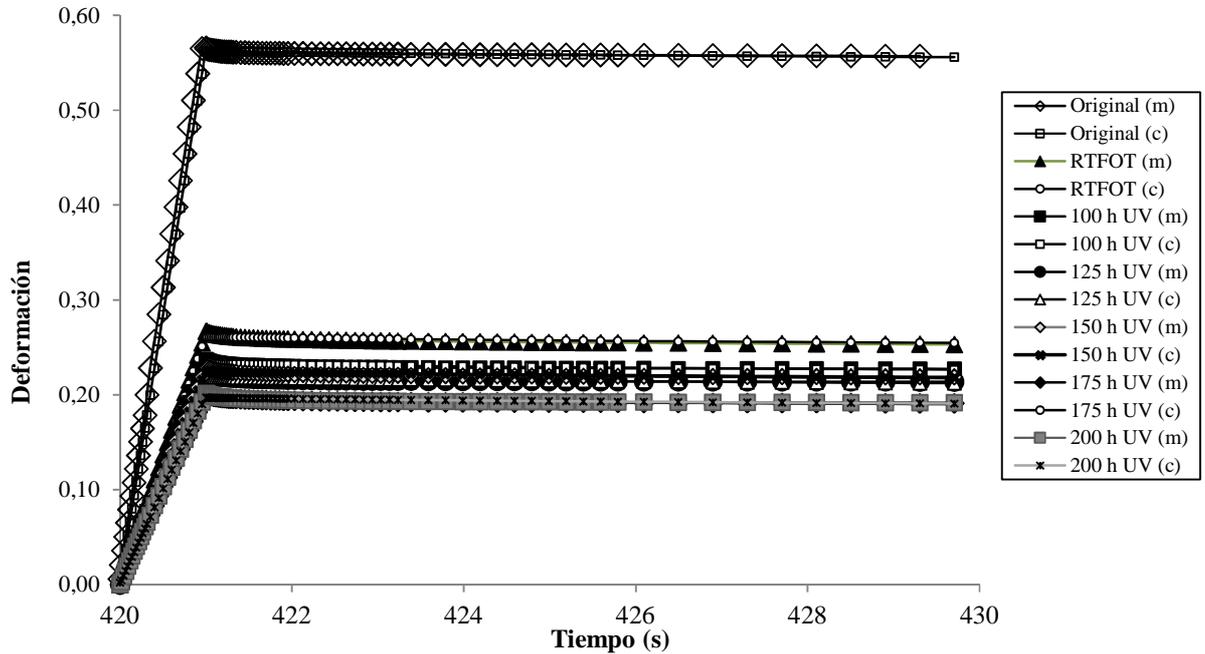


Figura 23: Deformación medida (m) y calculada (c) con el Modelo Burger, para el asfalto 80/100

Dado que la Ecuación 2 tiene múltiples soluciones, se consideraron valores constantes de las componentes elásticas del modelo de Maxwell (E_M) y de Kelvin-Voigt (E_K), así como la componente viscosa del modelo de Kelvin-Voigt (η_K), mientras que la componente viscosa del modelo de Maxwell (η_M) se determinó de manera que se minimizara el error entre la deformación medida por el DSR y la calculada por el modelo. El coeficiente de determinación (R^2) mínimo para los datos calculados con respecto a los medidos es de 0,999, lo cual explica la superposición de los valores de las deformaciones calculadas sobre los medidos en la Figura 22 y Figura 23.

En la Figura 22 y Figura 23 se observa la recuperación máxima que se presenta a las 175 h para el asfalto 60/70 y la ligera recuperación del asfalto 80/100 a las 150 h UV. Es importante comentar que para el asfalto 60/70 las curvas de las 150 h y 200 h UV se superponen, mientras que para el asfalto 80/100 las curvas de las de 125 h y 150 h UV se encuentran muy cercanas,

no obstante la de las 150 h UV se encuentra ligeramente arriba de la de 125 h, además las curvas de 175 y 200 h UV se superponen.

Para ambos tipos de asfalto se consideró un valor de E_M igual a 45.000 Pa y un E_K de 1.000 Pa, mientras que la variable η_K tomó valores de 7170 Pa·s y 9300 Pa·s, para el asfalto 60/70 y 80/100, respectivamente. La diferencia de los valores de η_K para cada tipo de asfalto se generó a partir de la evaluación del modelo para el asfalto original de cada uno de ellos. Los diferentes valores fueron asumidos como constantes para poder analizar los cambios generados en la viscosidad de cada una de las muestras analizadas, tras los diferentes grados de envejecimiento aplicados. La variación obtenida para η_M se presenta en la Figura 24.

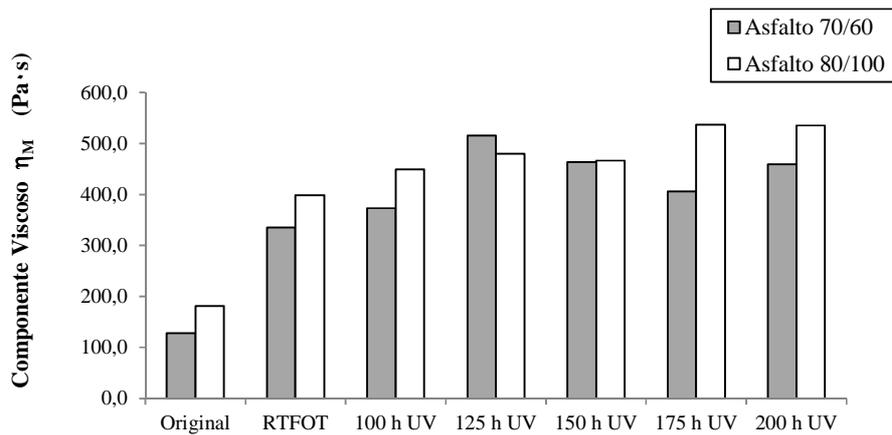


Figura 24: Valores de la componente viscosa η_M al aplicar el modelo viscoelástico de Burger

El término η_M se asocia al componente viscoelástico del comportamiento del asfalto (Liu & You, 2009), por lo que se espera que la magnitud de este componente aumente al aumentar el envejecimiento. Al generar la modelación del comportamiento del asfalto mediante el Modelo Burger, se observa la recuperación del asfalto 60/70 entre el 150 h UV y 175 h UV, así como una ligera recuperación a las 150 h UV para el asfalto 80/100.

4.2.4 Creep Repetitivo

Con este ensayo es posible determinar la deformación permanente que se genera en el asfalto a causada por las cargas del tránsito, generada por la deformación no recuperada del material. En las siguientes figuras se muestra el comportamiento de cada uno de los materiales analizados.

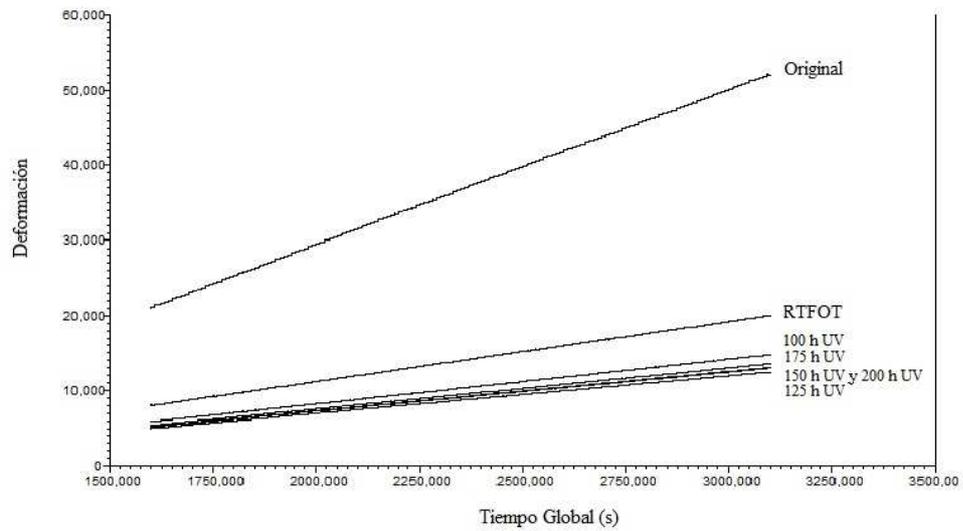


Figura 25: Deformación contra tiempo global de ejecución para el ensayo de Creep repetitivo, asfalto 60/70

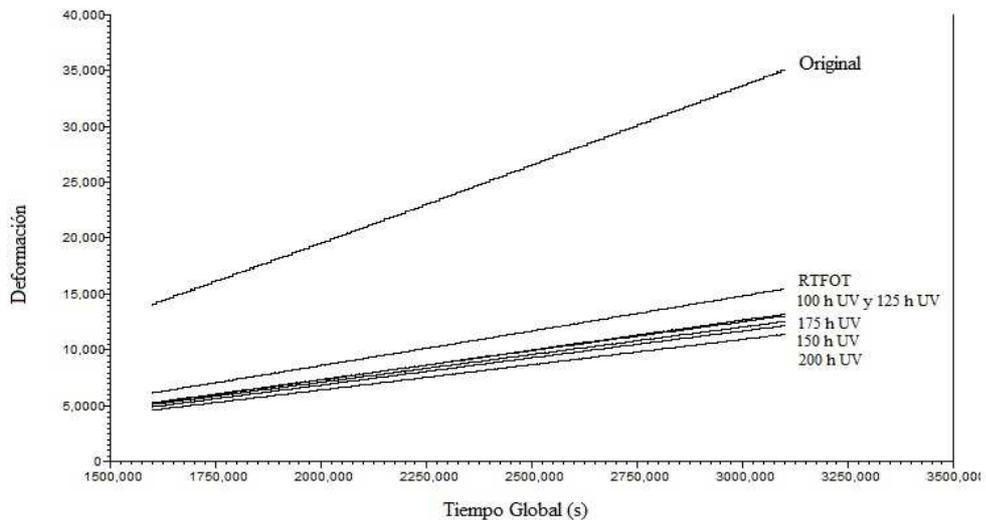


Figura 26: Deformación contra tiempo global de ejecución para el ensayo de Creep repetitivo, asfalto 80/100

Para el asfalto 60/70 el comportamiento del material es el mismo que para el ensayo MSCR, teniendo la rigidización del asfalto hasta las 125 h UV, mostrando una recuperación entre las 150 y 175 h UV. En el caso del asfalto 80/100, el comportamiento obtenido para el ensayo creep difiere del obtenido para el MSCR, ya que para el creep se presenta una leve recuperación pero a las 175 h UV.

4.2.5 Barrido de frecuencias

El barrido de frecuencias se realizó a diferentes frecuencias de aplicación de la carga, desde 0,1 Hz hasta 30 Hz, a una temperatura de 15 °C, para caracterizar el comportamiento del material a baja temperatura. Para este ensayo se registra el valor del módulo dinámico (Figura 27 y Figura 28) y el ángulo de fase (Figura 29 y Figura 30)

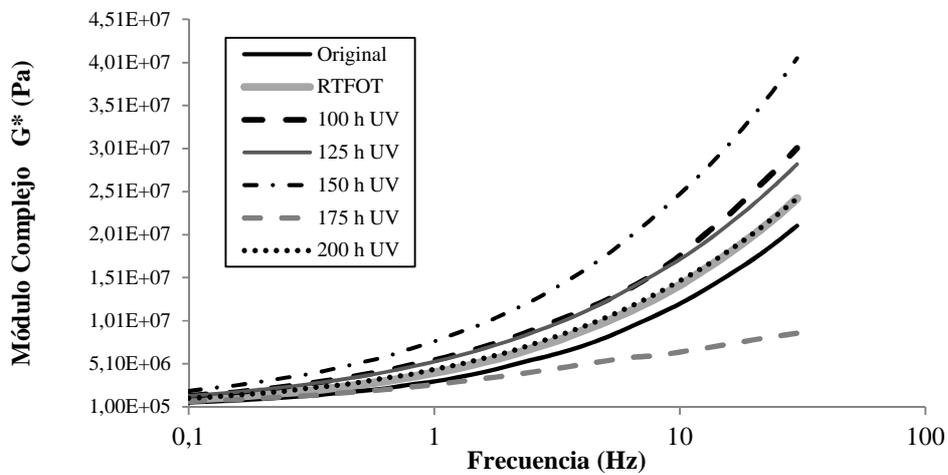


Figura 27: Módulo Complejo (G^*) en función de la frecuencia, asfalto 60/70

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

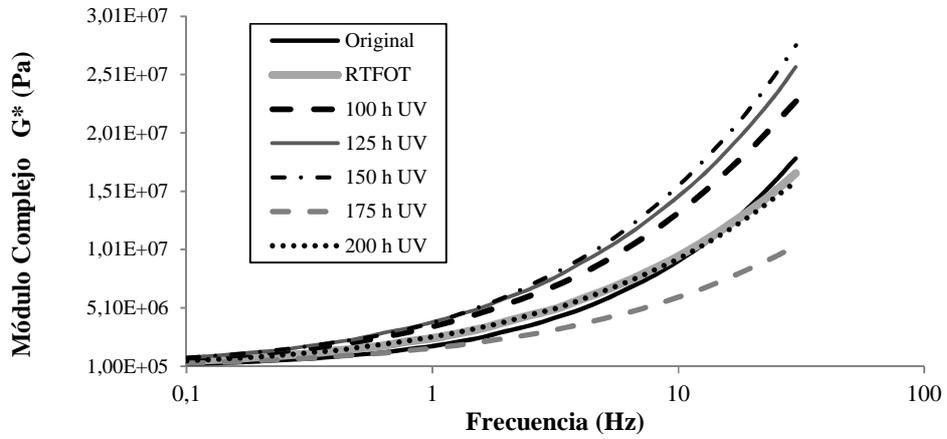


Figura 28: Módulo Complejo (G^*) en función de la frecuencia, asfalto 80/100

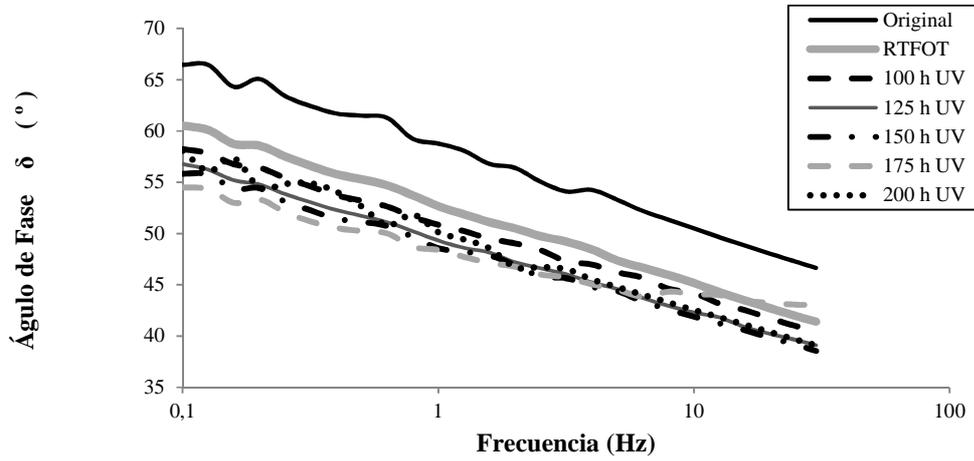


Figura 29: Ángulo de fase en función de la frecuencia, asfalto 60/70

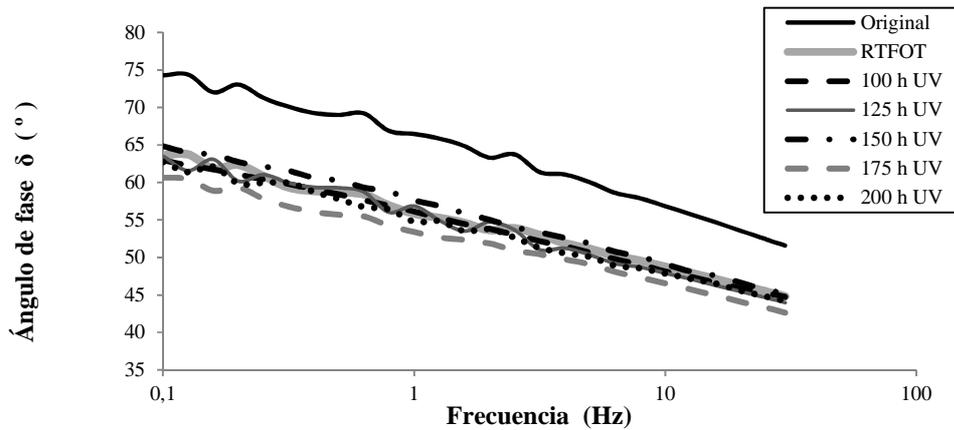


Figura 30: Ángulo de fase en función de la frecuencia, asfalto 80/100

A 15 °C se observa la recuperación del módulo complejo de ambos asfaltos (60/70 y 80/100), únicamente a las 175 h UV, lo cual no es claro si se realiza el análisis a partir de los resultados del ángulo de fase.

Adicionalmente, se realizó el cálculo del parámetro alfa (α), el cual es el inverso de m , en donde m es la pendiente del logaritmo de componente elástica del módulo complejo ($\log G^*$), en función del logaritmo de la frecuencia. Por lo que alfa es una medida que representa el cambio en el comportamiento elástico del material, en la Figura 31 se muestran los resultados obtenidos para α .

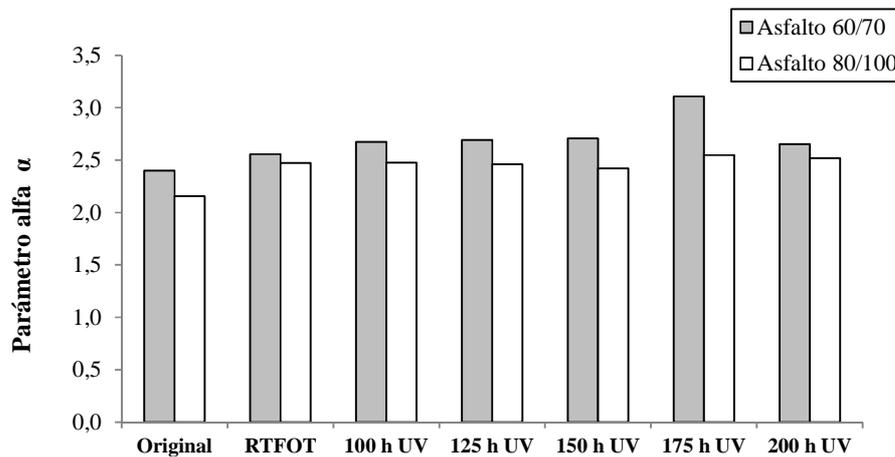


Figura 31: Magnitud del parámetro alfa (α) para ambos tipos de asfaltos.

Al envejecer el asfalto se obtiene una menor pendiente m , por lo que α tendería a aumentar. Para ambos asfaltos se observa el comportamiento esperado (aumento de α) entre el asfalto original y el envejecido RTFOT, para luego presentarse prácticamente constante para el asfalto envejecido con radiación UV, exceptuando al asfalto 60/70 con 175 h UV, el cual presenta un aumento importante.

4.3 Discusión General

A pesar de que en el periodo de exposición a la radiación no se observa, de manera directa, el comportamiento esperado según (Puello, 2013), quien afirma que al envejecer el material se presenta una disminución de los aromáticos y las resinas y un aumento de los asfaltenos, si se observa una relación entre el aumento de las resinas al disminuir los aromáticos, así como del aumento de los asfaltenos al disminuir las resinas (Figura 32 y Figura 33), a pesar de que esta relación no se presenta lineal con el periodo de exposición a la radiación, tal y como se describe en la sección 4.1.1 de este documento. La transformación molecular que se evidencia en las siguientes dos figuras se puede relacionar con la afirmación que Fernández et al (2014) realizan, los autores relacionan el fraccionamiento molecular del asfalto con la energía suministrada por la radiación UV, la cual puede generar ionización atómica o la formación de radicales libres, los cuales, debido a su alta reactividad, los cuales son capaces de generar reacciones en cadena que producen rompimientos moleculares o creando nuevos tipos de compuestos químicos.

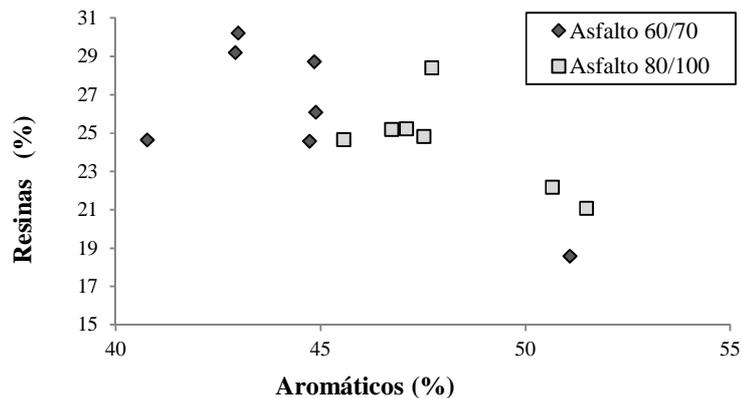


Figura 32: Porcentaje de resinas en función del porcentaje de aromáticos

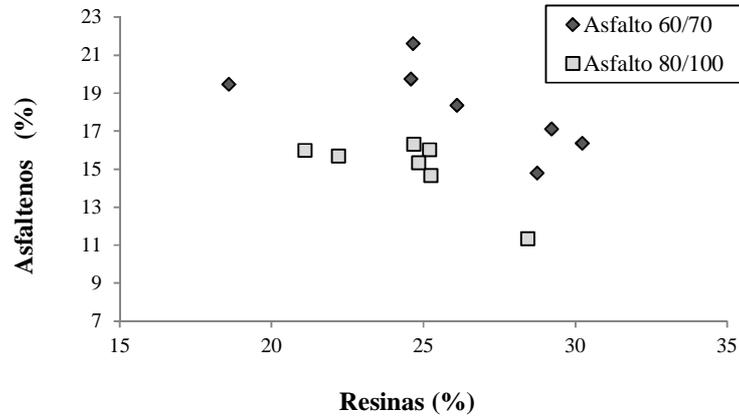


Figura 33: Porcentaje de asfaltenos en función del porcentaje de resinas

En cuanto a las resinas y asfaltenos, se espera que al aumentar su contenido porcentual el asfalto se endurezca (Read & Whiteoak, 2003), por lo que su módulo complejo y su viscosidad absoluta tendería a incrementarse al aumentar el porcentaje de resinas y/o asfaltenos. La tendencia reportada por Read & Whiteoak (2009) se presenta en los resultados obtenidos para las resinas en esta investigación, lo cual se observa en la Figura 34 y Figura 35. No obstante, no se observa una tendencia definida con respecto a los asfaltenos, lo cual se muestra en la Figura 36 y Figura 37. Los módulos complejos que se muestran en las siguientes figuras fueron obtenidos a las temperaturas asociadas a la clasificación de grado de desempeño (PG) por lo que son realizadas a 64 °C y 58 °C, para el asfalto 60/70 y 80/100, respectivamente.

A pesar de que no es posible identificar una relación entre la viscosidad y el módulo complejo con el contenido porcentual de asfaltenos, al analizar, específicamente el comportamiento del asfalto 60/70 se observa que entre las 150 y 175 h UV (en el que se presenta la recuperación de sus propiedades reológicas), se observa una disminución importante del módulo complejo, mientras que el porcentaje de asfaltenos se incrementa, hasta en un 5% con respecto a las 100 h UV, esto podría ser el resultado de un aumento del porcentaje de asfaltenos, pero con un tamaño molecular más pequeño, ya que según Groenzin & Mullins (2000) estos pueden variar su diámetro entre 10 y 20 Å (500-1000 amu), dado que los asfaltenos son las moléculas de mayor peso molecular del asfalto, la disminución en su

tamaño generaría un cambio en el peso molecular medio del asfalto, lo cual se relacionaría con una disminución de módulo complejo (Lu & Isacson, 2002).

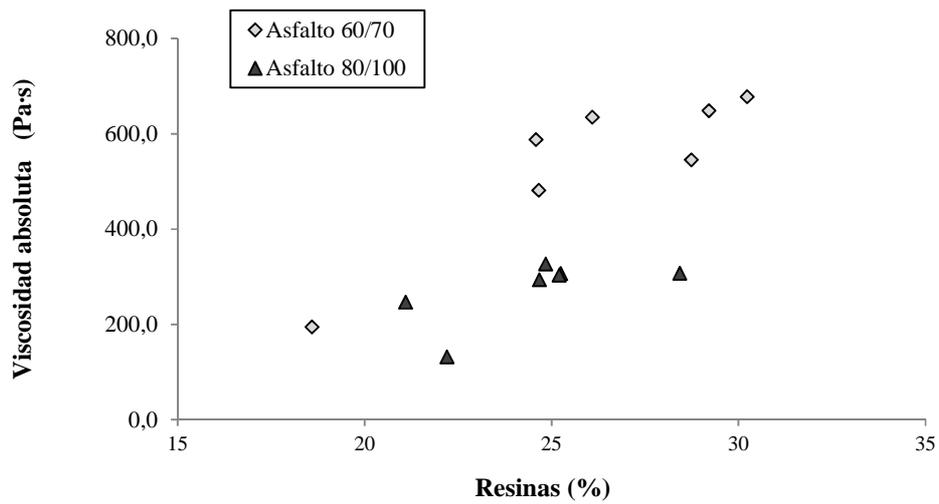


Figura 34: Viscosidad absoluta (60 °C) en función del porcentaje de resinas.

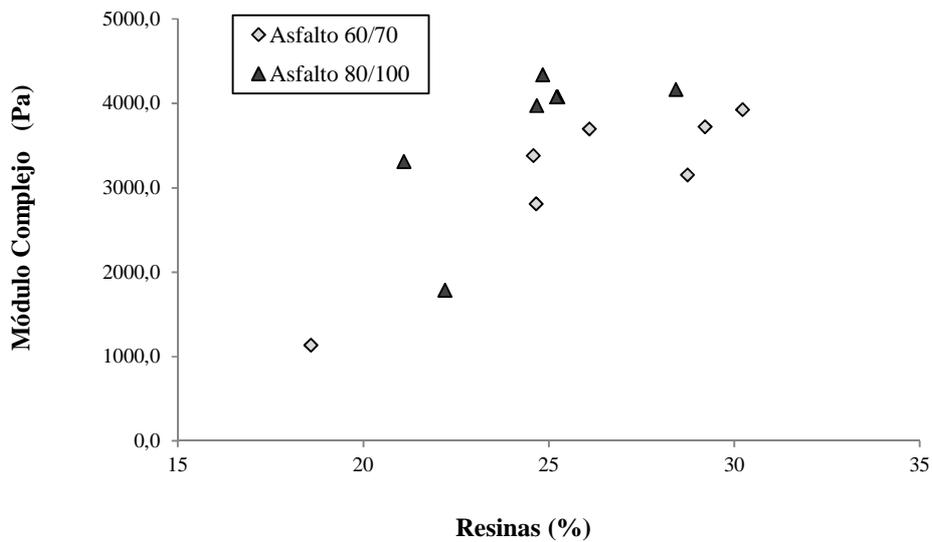


Figura 35: Módulo complejo (G^*) en función del porcentaje de resinas.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

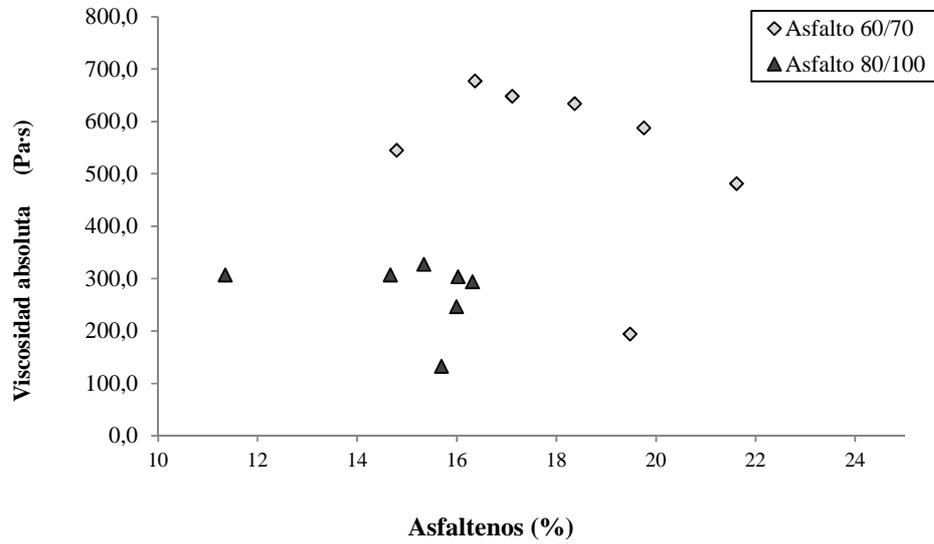


Figura 36: Viscosidad absoluta (60 °C) en función del porcentaje de asfaltenos

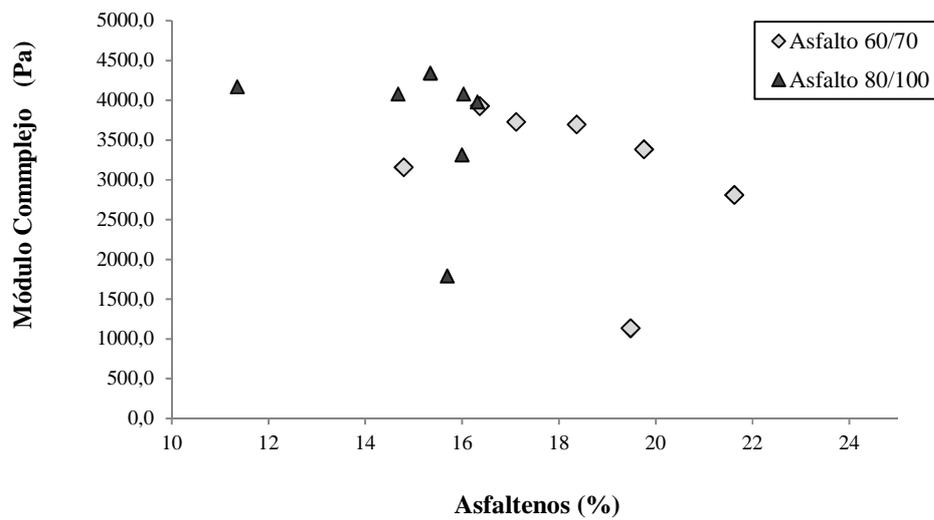


Figura 37: Módulo complejo (G^*) en función del porcentaje de asfaltenos

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

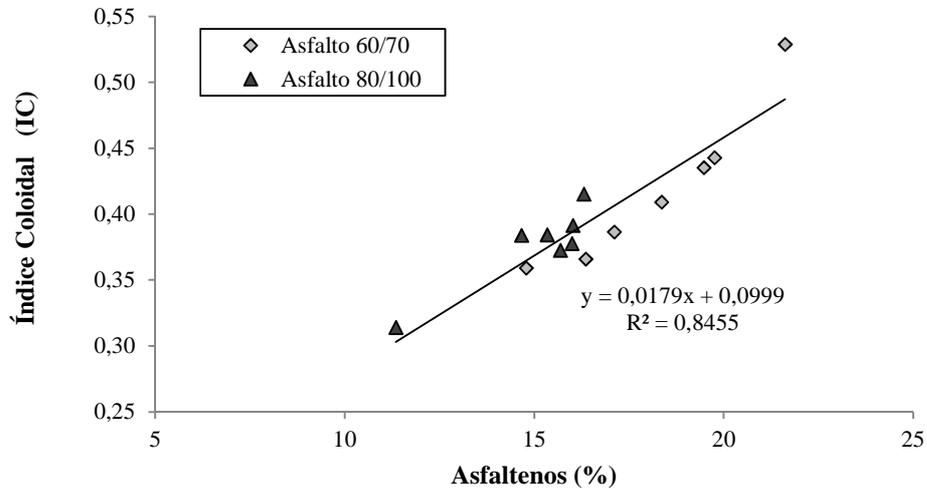


Figura 38: Relación entre el porcentaje de asfaltenos y el índice coloidal (IC)

En la figura anterior se muestra la relación que se presenta entre el índice coloidal y el porcentaje de asfaltenos, la cual presenta una relación creciente entre una y otra, de manera básicamente lineal. Reyes et al (2012) en su estudio de las fracciones SARA en asfaltos colombianos afirma que el índice coloidal aumenta al incrementarse el porcentaje de asfaltenos, no obstante, es importante acotar que para los asfaltos en estudio hay un cambio importante en el porcentaje de resinas, por lo que no necesariamente el aumento de asfaltenos implica un aumento del IC.

Adicionalmente, se relacionó el valor obtenido para la componente viscosa η_M asociada al modelo viscoelástico de Burger con la viscosidad y el módulo viscoso, los cuales se presentan en la Figura 39 y Figura 40. En relación a la viscosidad se observó una tendencia proporcional y lineal para cada tipo de asfalto analizado, presentando una pendiente mayor para el asfalto 60/70, al aumentar la magnitud de η_M , que para el asfalto 80/100. Por otro lado, la relación entre η_M y el Módulo Complejo se presenta una misma tendencia linealmente proporcional,

independientemente del tipo de asfalto, cuya ecuación de la recta se muestra en Figura 40, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,97.

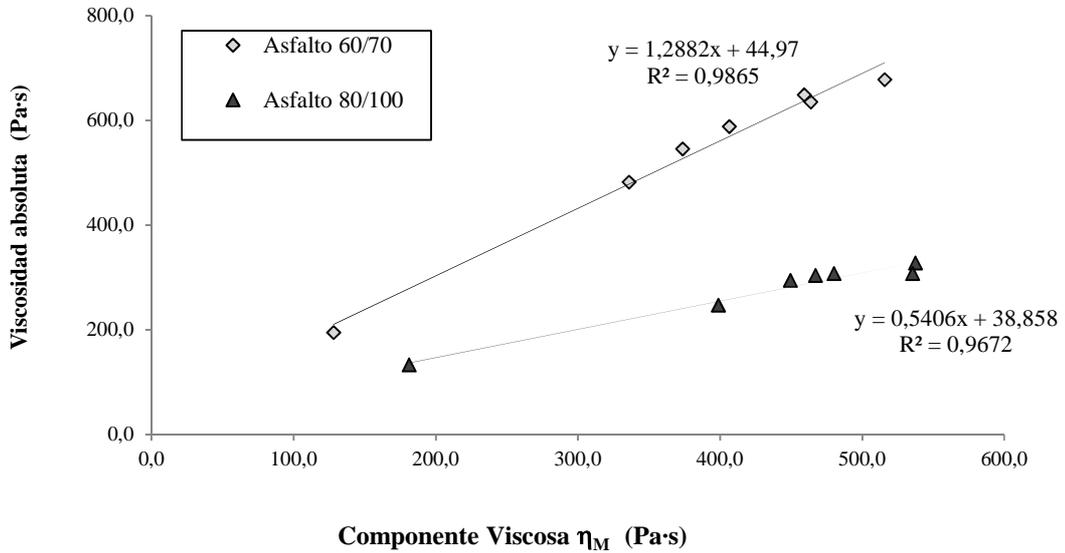


Figura 39: Viscosidad Absoluta en función de la componente viscosa η_M del modelo Burger.

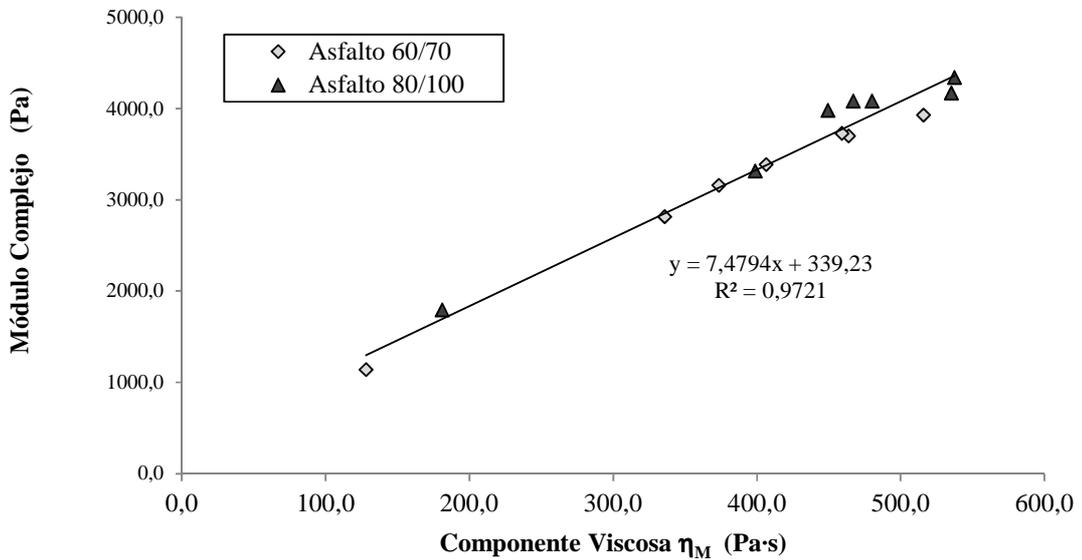


Figura 40: Módulo Complejo en función de la componente viscosa η_M del modelo Burger.

5. Conclusiones y Recomendaciones

Para el asfalto 60/70 se observa una recuperación importante de sus características reológicas que inicia a las 150 h UV y obtiene un valor máximo de recuperación a las 175 h UV, esto según los resultados obtenidos para la viscosidad absoluta (60 °C), el módulo complejo, el MSCR, en la componente viscosa η_M del modelo Burger, el creep repetitivo y en el módulo obtenido complejo determinado en el barrido lineal de frecuencias. El periodo en el que se presenta la recuperación de este asfalto coincide con una disminución importante del porcentaje de resinas.

En el asfalto 80/100 se presenta una leve recuperación de sus propiedades reológicas, principalmente, la cual se presenta entre las 150 y las 175 h de exposición a la radiación UV. La recuperación se presenta a las 150 h UV para los ensayos MSCR y en la componente viscosa η_M del modelo Burger, mientras que para los ensayos creep repetitivo, grado de desempeño (PG) y el barrido lineal de frecuencias se presenta a las 175 h UV.

La recuperación que se presenta en el asfalto no es atribuida a la oxidación del material, ya que por el contrario en el periodo en el que se recupera el asfalto es en el que se presenta un incremento del porcentaje de oxígeno. La recuperación es relacionada con cambios moleculares del material, en el que se modifica el contenido porcentual de las fracciones SARA y por lo tanto de sus propiedades. Las modificaciones moleculares generadas durante el periodo de exposición UV en estudio, podrían ser ocasionadas por el rompimiento de enlaces moleculares, como producto de la energía a la que se encuentra sometido el material, considerando tanto los 60 °C, como la radiación UV a la que se somete en la cámara de radiación.

Los cambios que se presentan en la estructura molecular de las fracciones que componen el asfalto, ocasionan modificaciones en su composición coloidal, por lo que podría estar pasando de un asfalto tipo gel, en los primeros períodos de exposición a la UV, a un asfalto

tipo sol entre las 150 y 175 h UV. Adicionalmente, en este periodo de recuperación se podría estar disminuyendo el promedio de peso molecular del material, lo que disminuiría su rigidez.

La modelación del comportamiento viscoelástico del asfalto mediante el modelo Burger permite simular de manera satisfactoria el comportamiento del material, obteniendo valores prácticamente iguales entre las deformaciones medidas y las estimadas con el modelo. Adicionalmente, se identifica una relación lineal, con un alto coeficiente de determinación, entre el valor del módulo complejo y la componente viscosa η_M del modelo, independientemente del tipo de asfalto analizado.

Se recomienda estudiar con mayor detalle las propiedades reológicas del asfalto a temperaturas intermedias, cercanas a la temperatura ambiente de la ciudad de Bogotá, ya que se evidencia una recuperación importante del asfalto a las 175 h de radiación UV a 15 °C. Adicionalmente, para entender con mayor claridad los cambios en la química del asfalto que generan la recuperación estudiada entre las 150 y 175 h UV, es necesario realizar otros ensayos de caracterización química, que permitan determinar con mayor exactitud el tipo de cambio que se presenta, tales como el peso molecular promedio y el peso molecular de los asfaltenos, mediante la aplicación de técnicas como cromatografía de permeación en gel, dada la importancia de esta fracción en las propiedades físicas y reológicas del asfalto; así como la aplicación de la cromatografía de separación por tamaños de alta velocidad (HS-SEC), pues esta técnica permite conocer la estabilidad coloidal del asfalto al identificar la cantidad de conglomerados de micelas de asfaltenos presentes.

6. Referencias Bibliográficas

1. Amado, H & Rojas, J. (2011). Caracterización de Asfaltos Colombianos Envejecidos 60/70 y 80/100. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia. Afanasieva, N., & Álvarez, M. (2004). Estudio del envejecimiento de los asfaltos colombianos bajo la acción de algunos factores climáticos. Ediciones UIS, ISBN 958-3371351.
2. Bahia, H., & Anderson, D. (1995). The Pressure Aging Vessel (PAV): a test to simulate rheological changes due to field aging. ASTM Special Technical Publication, 1241, 67–88.
3. Bell, C. A. (1989). Summary report on aging of asphalt-aggregate systems. Recuperado a partir de <http://trid.trb.org/view.aspx?id=306354>
4. Bianchetto, H., Recasens, R. M., & Jiménez, F. P. (2012). Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de filleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL. *Infraestructura Vial*, 9(17). Recuperado a partir de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2062>
5. Cárdenas, J., & Fonseca, E. (2009). Modelación del comportamiento reológico de asfalto convencional y modificado con polímero reciclado, estudiada desde la relación viscosidad-temperatura. *EIA*, 12(2), 125–137.
6. Cuadro, C. & Osorio, J. (2012). Construcción de las curvas maestras del Mástic a partir del análisis reológico de muestras elaboradas en laboratorio y de muestras recuperadas de mezclas en servicio. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

7. Durrieu, F., Farcas, F., & Mouillet, V. (2007). The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging. *Fuel*, 86(10), 1446–1451.
8. Fernández, W. D., Rondón, H. A., Daza, C. E., & Reyes, F. A. (2014). The effects of environmental aging on Colombian asphalts. *Fuel*, 115, 321–328.
9. Groenzin, H., & Mullins, O. C. (2000). Molecular size and structure of asphaltenes from various sources. *Energy & Fuels*, 14(3), 677–684.
10. Instituto del Asfalto. (1998). Antecedentes de los Metodos de Ensayo de Ligantes Asfálticos de Superpave. Asphalt Institute.
11. Liu, Y., & You, Z. (2009). Determining Burger’s model parameters of asphalt materials using creep-recovery testing data. En *Proceedings of the Symposium on Pavement Mechanics and Materials at the Inaugural International Conference of the Engineering Mechanics Institute*. Recuperado a partir de [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41008\(334\)3](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41008(334)3)
12. Loría, G. (2012). Evaluación de asfaltos modificados en laboratorio con distintos polímeros. *Infraestructura Vial*, 9(17). Recuperado a partir de <http://www.revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2065>
13. Lu, X., & Isacson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, 16(1), 15–22.
14. Martínez, G., & Caicedo, B. (2005). Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Recuperado a partir de <http://dspace.uniandes.edu.co/xmlui/handle/1992/747>

15. Petersen, J. C. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships. *Transportation Research E-Circular*, (E-C140). Recuperado a partir de <http://trid.trb.org/view.aspx?id=902386>
16. Puello, J. (2013). Evolucion del comportamiento viscoelastico lineal de fracciones pesadas del petroleo sometidas a envejecimiento acelerado. Recuperado a partir de <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/handle/123456789/7410>
17. Read, J., & Whiteoak, D. (2003). *The Shell Bitumen Handbook*. Thomas Telford.
18. Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón, H. A. (2012). Determinación de las fracciones SARA de asfaltos colombianos envejecidos al medio ambiente empleando cromatografía líquida en columna. *Revista EIA*, (17), 47–56.
19. Reyes, O., & Camacho, J. (2008). Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica. *Ingeniería e Investigación*, 28(3), 22–27.
20. Rodríguez, H., & González, F. (1992). *Manual de radiación solar en Colombia*. Departamento de física Universidad Nacional de Colombia.
21. Romero, C. M., & Gómez, A. (2002). Propiedades físicas y químicas de asfaltos colombianos tipo barrancabermeja y de sus respectivas fracciones de asfáltenos. *Revista de la Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 26(98-101), 127.
22. Rondón, H., Reyes, F., & Vacca, H. (2010a). Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá. *Rev. EIA. Esc. Ing. Antioq*, 135–145.
23. Rondón, H., Reyes, F., & Vacca, H. (2010b). Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá. *Revista EIA*. Recuperado a partir de <http://repository.eia.edu.co/handle/11190/176>

24. Salazar Delgado, J. (2013). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047). Recuperado a partir de <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/6050>
25. Sandoval, I., & Cremades, I. (2007). Caracterización de asfaltos mediante creep repetido multi-esfuerzo en reómetro de corte dinámico. Presentado en XIV CILA, Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Cuba.
26. Siddiqui, M. N., & Ali, M. F. (1999). Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts. *Fuel*, 78(9), 1005–1015.
27. Vargas, X., Afanasjeva, N., Álvarez, M., Marchal, P., & Choplin, L. (2008). Evolución del comportamiento viscoelástico del asfalto Inducida Bajo Termo-oxidación in situ en un reactor. *Dyna*, (155), 191–198.
28. Vargas, X., & Reyes, F. (2010). El fenómeno de envejecimiento de los asfaltos. *Ingeniería e Investigación*, 30(3), 27–44.
29. Yusoff, N. I. M., Shaw, M. T., & Airey, G. D. (2011). Modelling the linear viscoelastic rheological properties of bituminous binders. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2171–2189.

Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas.

7. Anexos

Anexo 1: Promedio (Prom.) y desviación estándar (Desv.) de la medición de las fracciones "SARA para cada uno de los asfaltos.

Asfalto	Fracciones	Original		RTFOT		100 h UV		125 h UV		150 h UV		175 h UV		200 h UV	
		Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.	Prom.	Desv.
60/70	Saturados	10,9%	0,18%	13,0%	0,22%	11,6%	0,02%	10,4%	0,96%	10,7%	0,63%	10,9%	0,06%	10,8%	0,93%
	Aromáticos	51,1%	0,89%	40,8%	0,56%	44,8%	0,26%	43,0%	0,21%	44,9%	0,72%	44,7%	0,32%	42,9%	0,15%
	Resinas	18,6%	0,33%	24,6%	0,23%	28,7%	0,55%	30,2%	0,93%	26,1%	0,12%	24,6%	0,85%	29,2%	0,38%
	Asfaltenos	19,5%	1,03%	21,6%	0,53%	14,8%	0,31%	16,4%	0,24%	18,4%	0,21%	19,8%	1,11%	17,1%	0,41%
80/100	Saturados	11,5%	0,32%	11,4%	0,39%	12,9%	0,46%	13,1%	0,30%	12,1%	0,24%	12,5%	0,01%	12,6%	0,55%
	Aromáticos	50,7%	0,23%	51,5%	0,55%	45,6%	0,10%	47,1%	0,72%	46,7%	0,62%	47,5%	0,18%	47,7%	1,69%
	Resinas	22,2%	0,76%	21,1%	0,29%	24,7%	0,62%	25,2%	0,39%	25,2%	0,62%	24,8%	0,15%	28,4%	1,22%
	Asfaltenos	15,7%	0,22%	16,0%	0,66%	16,3%	0,79%	14,7%	0,12%	16,0%	0,09%	15,3%	0,57%	11,3%	0,16%

Anexo 2: Relaciones entre las fracciones SARA para los diferentes tipos de asfaltos

Asfalto	Relaciones SARA	Original	RTFOT	100 h UV	125 h UV	150 h UV	175 h UV	200 h UV
60/70	Aromáticos/saturados	4,71	3,14	3,85	4,12	4,21	4,09	3,98
	Resinas/Asfaltenos	0,95	1,14	1,94	1,85	1,42	1,24	1,71
	IC	0,44	0,53	0,36	0,37	0,41	0,44	0,39
80/100	Aromáticos/saturados	4,42	4,50	3,54	3,59	3,85	3,81	3,79
	Resinas/Asfaltenos	1,41	1,32	1,51	1,72	1,57	1,62	2,50
	IC	0,37	0,38	0,42	0,38	0,39	0,38	0,31

Anexo 3: Área de Sulfóxidos (S=O) y carbonilos (C=O), calculados a partir del espectro generado por la técnica de espectroscopía infrarroja (FTIR)

Tratamiento de envejecimiento	Asfalto 60/70		Asfalto 80/100	
	S=O	C=O	S=O	C=O
Original	0,15	0,71	0,08	0,70
RTFOT	0,14	0,73	0,09	0,67
100 h UV	0,15	0,71	0,12	0,78
125 h UV	0,19	0,64	0,16	0,72
150 h UV	0,19	0,70	0,12	0,86
175 h UV	0,17	0,69	0,15	0,69
200 h UV	0,19	0,58	0,14	0,70

Anexo 4: Resultados obtenidos en el ensayos de grado de desempeño (PG) a la temperatura alta para el asfalto 60/70

Parámetro	Tratamiento de envejecimiento	Temperatura					
		58 °C		64 °C		70 °C	
		Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
Módulo Complejo G* (Pa)	Original	2558,0	76,8	1138,1	43,6	611,0	95,6
	RTFOT	6504,7	26,0	2813,8	44,1	1246,7	66,6
	100 h UV	7396,7	127,5	3157,9	18,1	1411,9	18,4
	125 h UV	9321,7	142,1	3929,2	3,8	1751,9	49,5
	150 h UV	8740,1	63,7	3700,1	20,9	1617,6	4,4
	175 h UV	7941,6	226,9	3386,8	73,5	1470,7	30,7
	200 h UV	8785,1	138,0	3728,8	47,4	1631,2	16,9
Ángulo de fase δ (°)	Original	85,7	0,10	87,0	0,08	87,9	0,26
	RTFOT	81,5	0,04	83,9	0,06	85,7	0,15
	100 h UV	81,0	0,05	83,4	0,04	85,4	0,02
	125 h UV	79,9	0,07	82,6	0,05	84,7	0,07
	150 h UV	80,3	0,04	82,9	0,05	84,9	0,05
	175 h UV	80,8	0,07	83,3	0,05	85,3	0,04
	200 h UV	80,2	0,02	82,8	0,01	84,9	0,09

Anexo 5: Resultados obtenidos en el ensayos de grado de desempeño (PG) a la temperatura alta para el asfalto 80/100

Parámetro	Tratamiento de envejecimiento	Temperatura					
		52 °C		58 °C		64 °C	
		Promedio	Desviación	Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
Módulo Complejo G* (Pa)	Original	3907,1	35,2	1792,0	114,6	802,0	39,7
	RTFOT	7952,9	148,2	3316,2	81,0	1462,8	24,1
	100 h UV	9436,6	15,2	3979,6	166,3	1733,6	30,7
	125 h UV	9865,9	103,9	4081,9	57,7	1805,1	57,6
	150 h UV	9755,9	147,0	4081,7	119,8	1788,1	66,7
	175 h UV	10546,3	66,2	4341,2	16,0	1927,2	57,0
	200 h UV	10320,7	41,5	4169,3	71,9	1808,1	32,1
Ángulo de fase δ (°)	Original	86,1	0,04	87,2	0,13	88,2	0,07
	RTFOT	83,0	0,11	85,0	0,04	86,5	0,00
	100 h UV	82,2	0,04	84,5	0,06	86,1	0,01
	125 h UV	82,0	0,03	84,3	0,02	86,0	0,01
	150 h UV	82,2	0,12	84,4	0,18	86,1	0,12
	175 h UV	81,7	0,05	84,1	0,06	85,9	0,03
	200 h UV	81,9	0,11	84,3	0,06	86,0	0,03

Anexo 6: Resultados obtenidos para el ensayo de Viscosidad Absoluta (60°)

Asfalto	Tratamiento de envejecimiento	Parámetro			
		Módulo Complejo G* (Pa)		Ángulo de fase δ (°)	
		Promedio	Desviación	Promedio	Desviación
60/70	Original	1905,7	73,8	86,1	0,09
	RTFOT	4815,8	71,9	82,3	0,05
	100 h UV	5453,9	28,4	81,7	0,04
	125 h UV	6776,4	77,7	80,8	0,04
	150 h UV	6346,1	160,6	81,1	0,05
	175 h UV	2470,9	40,9	85,5	0,01
	200 h UV	6483,6	93,3	81,0	0,03
80/100	Original	1327,9	68,9	87,5	0,10
	RTFOT	2470,9	40,9	85,5	0,01
	100 h UV	2943,1	51,3	85,0	0,01
	125 h UV	3071,5	98,3	84,8	0,00
	150 h UV	3037,7	115,2	85,0	0,14
	175 h UV	3274,7	76,7	84,7	0,03
	200 h UV	3076,3	51,1	84,9	0,02