



FACULTAD DE INGENIERIA

Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Envejecimiento de Mezclas Asfálticas 60-70 y 80-100 a largo plazo.

Presentado por:

Avaro Alexander Ardila Muñoz

Sonia Patricia Granados Vera

Director

Fredy Reyes Lizcano

Bogotá D.C.

Mayo de 2012

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Envejecimiento de mezclas asfálticas 60-70 y 80-100 a largo plazo.”, desarrollado por los estudiantes Alvaro Alexander Ardila Muñoz y Sonia Patricia Granados Vera, 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

Fredy Alberto Reyes Lizcano

Jurado 1

Director de trabajo de grado

Jurado 2

Director de trabajo de grado

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios y a la Virgen por iluminarnos el camino.

Agradecemos a nuestras familias que con su amor, apoyo, consejos y confianza ayudaron a culminar exitosamente esta etapa de nuestras vidas.

Al Ingeniero Wilmar Fernández nuestros más sinceros agradecimientos por su guía, apoyo y conocimientos aportados a este Trabajo de Grado.

Al grupo de trabajo del Laboratorio de la Pontificia Universidad Javeriana por poner a nuestro servicio sus conocimientos y experiencia.

Y a todas las personas que de una u otra manera nos dieron palabras de aliento y fortaleza durante el desarrollo de este Trabajo de Grado.

DEDICATORIA

A mis padres... porque creyeron en mí y suministraron el andamiaje necesario para alcanzar la cima de mis sueños, porque sin ustedes no tendría un norte definido, porque son la base que todo hijo necesita para construir futuro y porque indiscutiblemente son mi principal modelo a seguir.

A mis hermanas y novia porque siempre me brindaron palabras de apoyo en los momentos más difíciles, porque fueron incondicionales en todo mi proceso de superación fomentando el deseo de lucha y perseverancia y porque tuvieron la paciencia y comprensión necesaria para sobrellevar esta etapa de mi vida.

A todos, espero no defraudarlos y contar siempre con su valioso apoyo, sincero e incondicional.

.....ALVARO

Son mis padres los que siempre me han apoyado incondicional en cada etapa nueva de mi vida, me han guiado y brindado sus mejores deseos en cada reto profesional y académico, son ellos la razón de ser cada día mejor y de dedicar este trabajo de investigación con el ánimo de retribuir y agradecer cada uno sus esfuerzos, amor y dedicación que me han entregado.

A mi hermana, mi prima y mis amigos que me ofrecieron su apoyo en los momentos que más lo necesitaba, por sus palabras de ánimo y su ayuda en el trabajo, ya que sin su colaboración no hubiera adelantado este proyecto que representa una culminación de una etapa y un logro profesional y personal.

SONIA PATRICIA

RESUMEN

Esta investigación conlleva a la determinación del envejecimiento de largo plazo de las mezclas asfálticas tipo MDC – 2 de Invías, producidas con asfaltos colombianos 60-70 y 80-100 basados en las propiedades dinámicas, químicas y reológicas. La investigación pretende estimar los tiempos reales de envejecimiento de las mezclas asfálticas a largo plazo en Colombia, con la implementación de procedimientos que establezcan una forma más adecuada en el manejo de las mezclas asfálticas. Para ello, es necesario desarrollar diferentes ensayos de laboratorio de tipo químico, reológico y dinámico respectivamente. En el caso de los ensayos de tipo químico, se realizará evaluación por el método S.A.R.A. (saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos) y Espectroscopía Infrarroja, mediante recuperación de bitumen de las mezclas asfálticas envejecidas a 1000 horas. En la evaluación reológica, se realizarán envejecimientos del ligante asfáltico a través de los ensayos de película delgada rotatoria (envejecimiento de corto plazo) y cámara de envejecimiento a presión (envejecimiento de largo plazo), para luego someterlos a ensayos de tipo reológico mediante el reómetro de corte dinámico. Como parte de la evaluación dinámica en ésta investigación, se realizarán módulos resilientes y módulos dinámicos de las mezclas asfálticas con asfaltos colombianos 60-70 y 80-100 y tiempos de 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 horas. Una vez logrados los resultados de laboratorio, se realizarán comparaciones de tipo químico, dinámico y reológico y con base en la información obtenida, determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas envejecidas para los tiempos estimados.

Palabras claves: Reología, módulo resiliente, módulo dinámico, envejecimiento a largo plazo, Sara, espectroscopía IR.

ABSTRACT

This research entail to determination to aging of large term of the asphalt mixtures produce with Colombian asphalts (MDC-2) 60-70 and 80-100 based on the physical properties, chemical and rheological. The research tries to estimate the royal times of aging of the asphalt mixtures long term in Colombia, with the implementation of procedures that establish a form more adequate in the managing of the asphalt mixtures.

For it, are necessary development different laboratory attempts of chemical type, rheological and dynamic respectively. In the case of the attempts of chemical type, evaluation will realize by the method S.A.R.A. (Saturated, aromatics, resins and asphaltenes) and Infrared Spectroscopy through recovery of bitumen of the asphalt mixtures aged at 1000 hours. In the rheological evaluation will realize aging of asphalt for rotating thin film (short-term aging) and aging chamber pressure (large term aging) then to submit them to attempts in the rheometer of dynamic cut. As part of the dynamic evaluation of this research will be realized Modules Resilientes and dynamic modules of the asphalt mixtures by Colombian asphalts 60-70 y 80-100 to different times that change into 0 hours and 100 hours once the laboratory results are achieved, will realized comparisons with base in the information obtained to determine the behavior of the asphalt mixtures aged to different times.

Key words: Rheology, Module resiliente, dynamic Module, long-term aging, Sara, spectroscopy IR.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. MARCO DE ANTECEDENTES	4
3. MARCO CONCEPTUAL	29
3.1 ASFALTO	29
3.2 OXIDACIÓN	30
3.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS	31
3.4 ENVEJECIMIENTO DE CORTO PLAZO (ENSAYO RTFOT)	32
3.5 ENVEJECIMIENTO DE LARGO PLAZO (ENSAYO PAV)	34
3.6 DIFERENCIAS ENTRE LOS ENVEJECIMIENTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE CORTO Y DE LARGO PLAZO.	35
3.7 REOMETRO DE CORTE DINÁMICO – DSR	36
3.8 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA	37
3.9 MÓDULO RESILIENTE	38
3.10 ESPECTROSCOPÍA	39
3.11 METODO S.A.R.A.	40
4. METODOLOGIA	41
4.1 ASFALTO ORIGINAL	42
4.2 ESPECIFICACIONES DEL ASFALTO ORIGINAL	43
4.2.1. ESPECIFICACIONES REOLÓGICAS	45
4.2.2 ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL ENSAYO.	49

4.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS	51
4.4. GRANULOMETRÍA	55
4.5 CAMARA ULTRAVIOLETA.....	58
4.6 MÓDULO DINÁMICO.....	61
4.7 MÓDULO RESILIENTE	62
4.8 ESPECTROSCOPIA.....	64
4.9 MÉTODO S.A.R.A.	65
5. MATERIALES Y METODOS	66
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
6.1 EVALUACIÓN REOLÓGICA.....	67
6.2 MÓDULOS DINÁMICOS	70
6.3 MODULOS RESILIENTES	75
6.4 ESPECTROSCOPIA.....	77
6.5 METODO S.A.R.A.	81
6.6 EFECTO DE LA RADIACION ULTRAVIOLETA EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS 60/70 Y 80/100.....	84
6.7 INDICE DE ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO REPRESENTANDO EL PRIMER AÑO DE SERVICIO	87
7. CONCLUSIONES.....	90
8. BIBLIOGRAFIA.....	92

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Efecto de Temperatura PAV (90 – 110 °C) en relación con el Módulo Complejo (G*) a 45°C y 10 rad/s para cuatro tipos de asfaltos. (Fuente: Bahía & Anderson 1994)</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 (a,b). Efecto de envejecimiento oxidativo en el PAV en curvas maestras reológicas de un asfalto típico –del ángulo de fase (fuente: Bahía & Anderson 1994).....</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3 - Espesor de la película de asfalto vs módulo resiliente después de un envejecimiento de corto plazo. (fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy Chakraborty 1996)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4 - Espesor de la película de asfalto frente a módulo resiliente después de envejecimiento de largo plazo. (fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy Chakraborty 1996)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5 - Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 3 años. (Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 - Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 5 años. (Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003)</i>	<i>14</i>
<i>Figura 7 -Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 7 años. (Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003).....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 8 - Módulo complejo G* del ligante original, residuo RTFOT y residuo PAV a frecuencia constante de 10 rad/seg.(Fuente: Martínez & Caicedo, 2005)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 9 - Ángulo de fase (δ) del ligante original residuo RTFOT y residuo PAV a frecuencia constante de 10 rad/seg.(Fuente: Martínez & Caicedo, 2005).</i>	<i>18</i>
<i>Figura 10 - Módulo complejo (G*) vs Temperatura del asfalto envejecido en cámara UV-B. (Fuente: Martínez & Caicedo,2005).....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 11 - Gráfica de módulo complejo (G*) vs Temperatura del asfalto recuperado de la mezcla a 4 profundidades. (Fuente: Martínez & Caicedo,2005).</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12 - Evolución del módulo resiliente inicial e_0 de la mezcla MDC-2 con la temperatura T y la frecuencia de carga F. (fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).</i>	<i>23</i>
<i>Figura 13 - a) Evolución del módulo resiliente E con el tiempo de exposición T. b) Evolución de la deformación permanente vertical con el tiempo de exposición T. (fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).</i>	<i>24</i>
<i>Figura 14 - Resultados del horno de envejecimiento de corto plazo. (fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15 - Resultados de extendido de mezcla. (fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).</i>	<i>27</i>
<i>Figura 16 - Efecto de la presión de oxidación con presión de aire comprimido (fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).</i>	<i>28</i>
<i>Figura 17 - Horno Rotatorio de Película Delgada. (Fuente: Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana).....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 - Circulación de flujo de aire forzado. (Fuente: Manual de instrucciones rolling thin film oven).....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19 - Equipo PAV. (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20 - Diferencia de envejecimiento de Corto y de Largo Plazo (Presentación propia de los Autores).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 21 - Equipo DSR (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana).....</i>	<i>36</i>

<i>Figura 22 -Tipos de rayos ultravioleta (fuente: tomado de http://rainforestradio.com)</i>	38
<i>Figura 23 - Diagrama Metodológico (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	42
<i>Figura 24 - Dimensiones de los platos metálicos (fuente: I.N.V. E – 750 – 07 – 1)</i>	50
<i>Figura 25 - Granulometría de la mezcla asfáltica MDC – 2 (Fuente: INVIAS, 2007)</i>	53
<i>Figura 26 - Briquetas para ensayo de módulo dinámico (10cm x20 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	56
<i>Figura 27 -Briquetas para ensayo de módulo resiliente (10cm x7 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores).</i>	57
<i>Figura 28 - Briquetas en la cámara ultravioleta. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	58
<i>Figura 29 a - Briquetas en horno para ensayo de Módulo Dinámico. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	61
<i>Figura 29 b - Instalación de deformímetros (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	61
<i>Figura 29 c - Ubicación de carga vertical para asignación de carga vertical. Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	61
<i>Figura 30 - Equipo NAT para ensayo de módulo resiliente (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana)</i>	63
<i>Figura 31 - Comparación del módulo complejo vs temperatura para los asfaltos envejecidos a 20 y 50 horas. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	67
<i>Figura 32 - Comparación de ángulo de fase vs temperatura para asfalto 60-70 y 80-100 envejecidos a 20 y 50 horas. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	69
<i>Figura 33 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 60-70 envejecida con 4% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	70
<i>Figura 34 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 60-70 envejecida con 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los autores)</i>	71
<i>Figura 35 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 80 - 100 envejecidas con 4% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	72
<i>Figura 36 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 80 – 100 envejecidas con 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	73
<i>Figura 37 - Comparación de módulo resiliente vs frecuencia de las mezclas asfálticas 60 -70 y 80 – 100 con 4% y 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	76
<i>Figura 38 - Absorbancia vs longitud de onda para asfalto 80 – 100. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	78
<i>Figura 39 - Consolidado del fraccionamiento SARA y los índices de inestabilidad coloidal y estructural.</i>	83
<i>Figura 40 - Índice de pre-envejecimiento a largo plazo estimando un periodo de un año. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	89

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1 - Valores de la radiación solar (kwh/m²/día) en Bogotá. (fuente: Reyes, Camacho – 2008).</i>	7
<i>Tabla 2 - Propiedades de compactación de mezclas asfálticas envejecidas a corto y largo plazo. (fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy, Chakraborty 1996)</i>	10
<i>Tabla 3 - Condiciones del envejecimiento acelerado. (Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo - 2003)</i>	13
<i>Tabla 4 - Resultados obtenidos de la caracterización reológica del ligante (Fuente: Martinez & Caicedo, 2005).</i>	19
<i>Tabla 6 - Promedios Meteorológicos mensuales para la ciudad de Bogotá D.C. (Fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).</i>	22
<i>Tabla 8 - Especificaciones del cemento asfáltico (fuente: Invías).</i>	43
<i>Tabla 10 - Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG (N-Cmt-4-05-004/08)</i>	48
<i>Tabla 12 - Granulometría de diseño para la mezcla asfáltica mdc-2 (fuente: INVIAS, 2007)</i>	52
<i>Tabla 13 - Propiedades de la mezcla de agregados pétreos (Presentación propia de los autores)</i>	54
<i>Tabla 14 - Número de giros del compactador giratorio SUPERPAVE. (Fuente: SHRP: Strategic Highway Research Program, por sus siglas en inglés, 1994)</i>	55
<i>Tabla 15 - Granulometría para briquetas de ensayo de módulo dinámico (10x20 cm) (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	56
<i>Tabla 17 - Relación de número de briquetas para ensayo de módulo dinámico (10cmx20 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	59
<i>Tabla 18 - Relación de número de briquetas para ensayo de módulo resiliente (10cmx7 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	60
<i>Tabla 19 - Relación de los materiales y métodos utilizados en la presente investigación (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	66
<i>Tabla 20 - Relación de áreas bajo curva de absorbancia. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	78
<i>Tabla 21 - Cálculo de índices funcionales por espectroscopía (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	79
<i>Tabla 22 - Relación de tiempo de envejecimiento en cámara UV con el tiempo de exposición en años. (Fuente: Presentación propia de los Autores)</i>	81
<i>Tabla 23 - Valores de la radiación solar (kwh/m²/día) en Bogotá (Fuente: González y Rodríguez, 2005).</i>	84
<i>Tabla 24 - Relación de tiempos de envejecimiento en cámara UV con tiempos de exposición en años. (fuente: presentación propia de los autores)</i>	87

1. INTRODUCCIÓN

Existe la necesidad de investigar y profundizar el envejecimiento de mezclas asfálticas a largo plazo, puesto que los asfaltos experimentan un notable deterioro antes de alcanzar su vida útil estimada por lo que se pretende determinar los factores asociados con éste fenómeno (Reyes & Millán, 2009).

Las propiedades del asfalto cambian a la largo de la vida útil y debido a esto las especificaciones utilizadas para el diseño de vías no aseguran el buen desempeño después que el asfalto ha sido mezclado y puesto en obra para soportar los esfuerzos propios del tráfico vehicular. Durante el proceso de producción de la mezcla asfáltica, el asfalto se oxida por acción del oxígeno del aire y de las altas temperaturas de mezclado, permitiendo que el fenómeno de envejecimiento inicie en forma inmediata y posteriormente, es inducido por los diversos factores climáticos que inciden en los pavimentos.

Bahia & Anderson (1994), han diagnosticado que el envejecimiento de las mezclas asfálticas es uno de los factores que más inciden en el acortamiento de la vida útil de los pavimentos, sus consecuencias incluyen tanto la disminución de las condiciones de confort y seguridad, así como el perjuicio económico que significa realizar tareas frecuentes de mantenimientos y rehabilitación.

El envejecimiento de mezclas asfálticas ha sido objeto de varias investigaciones, donde se trata de simular en forma acelerada algunos mecanismos que influyen en este proceso de deterioro, como la oxidación. En la presente investigación se desarrollará la evaluación reológica para el ligante asfáltico producto de las pruebas de envejecimiento de corto y largo plazo, así mismo, los ensayos correspondientes al módulo dinámico, módulo resiliente, S.A.R.A.(saturados, aromáticos resinas y asfaltenos) y espectroscopía infrarroja, con el objeto

determinar la variación de las propiedades dinámicas y químicas de las mezclas asfálticas y de esta manera contribuir con un aporte experimental como parte de la solución a los enigmas del envejecimiento.

1.1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.

Se desea incursionar en el tema de envejecimiento a largo plazo de las mezclas asfálticas en Colombia, dado que a lo largo de la historia se han realizado diversas investigaciones fuera de nuestro país, sin que se obtenga el criterio suficiente para emplearlo en los asfaltos colombianos; entre otras cosas, porque los adelantos que se han logrado hasta el momento en países de Europa o en Estados Unidos no son directamente aplicables en nuestra geografía colombiana, debido a que el envejecimiento de mezclas asfálticas está asociado a factores climáticos, tráfico vehicular de cada territorio y alteraciones de las propiedades físico-químicas de las mezclas asfálticas.

Estas afectaciones, son evidencia notable del envejecimiento de las mezclas asfálticas y conlleva a una disminución considerable de durabilidad en los pavimentos, ocasionando pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas.

El proceso de investigación se hace aún más difícil cuando los únicos adelantos de profundización del fenómeno de envejecimiento dependen de la aplicación de ciertas técnicas y estudios de países de afuera; sin embargo, algunas universidades nacionales están promoviendo temas de profundización que permitan obtener información funcional y aplicable a los pavimentos colombianos.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar el envejecimiento de largo plazo de las mezclas asfálticas producidas con asfaltos colombianos 60 – 70 y 80 – 100, basado en la variación de las propiedades dinámicas y químicas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos después de ser sometidos a envejecimiento de largo plazo.
- ✓ Medir el progreso de oxidación mediante el cambio de los grupos químicos en las mezclas asfálticas.
- ✓ Evaluar el desempeño dinámico de las mezclas asfálticas producidas en laboratorio después de ser sometidas a envejecimiento de largo plazo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO DE ANTECEDENTES

Existen adelantos importantes en el tema del envejecimiento de mezclas asfálticas a largo plazo y han sido implementados con entereza durante las últimas cinco décadas en las carreteras de Estados Unidos y la Unión Europea. Realmente en Colombia las investigaciones apenas dan comienzo al desarrollo de nuevas técnicas que permitan entender el comportamiento de las carpetas asfálticas.

El estado del arte, expone asiduamente adelantos sustanciales necesarios para futuras investigaciones que se retoman bien sea para discutirlos o para confeccionar mejoras en pro del funcionamiento estructural de los pavimentos. Gracias a esto, podemos citar los autores más importantes e influyentes que han desarrollado investigaciones en este campo, resumiendo las características de sus ensayos, así como los resultados obtenidos.

- **Bahia & Anderson (1994)**

”El envejecimiento por oxidación cambia la estructura molecular de los asfaltos creando moléculas más grandes y polares”.

El objetivo del procedimiento de envejecimiento PAV fue simular envejecimiento de campo a largo plazo. Este objetivo, sin embargo, tuvo que ser puesto en perspectiva: ya que el envejecimiento en el campo se sabe que está afectado por otros factores que no están relacionados con el aglutinante de asfalto. Las características de la mezcla y las condiciones de temperatura del pavimento se encuentran entre las más importantes. Las características de la mezcla no están relacionadas con la composición del asfalto y de considerar el aglutinante como

una parte de una prueba de envejecimiento no es ni práctico ni viable, particularmente con respecto a las prácticas y técnicas de producción del asfalto.

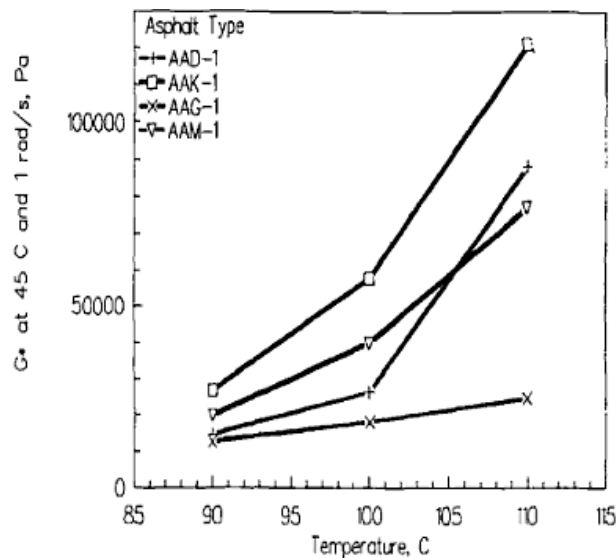
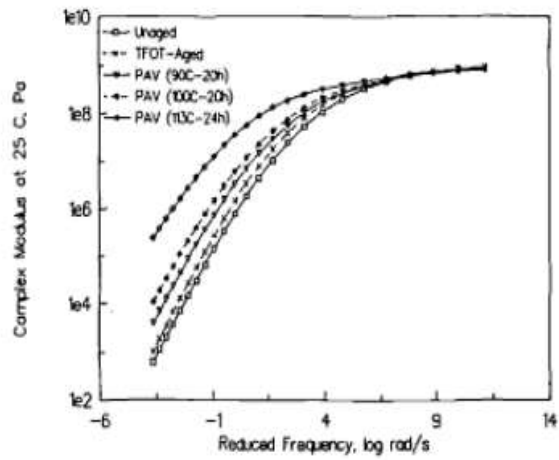


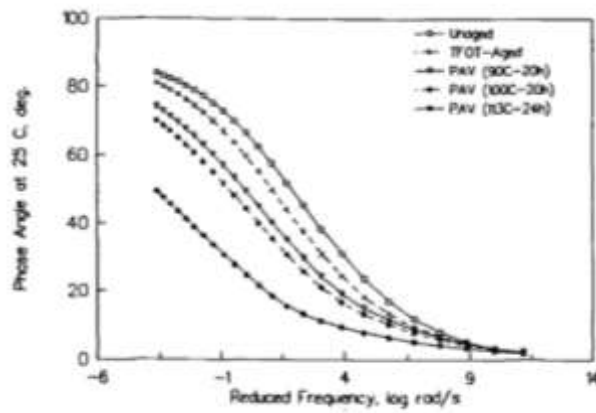
Figura 1. Efecto de Temperatura PAV (90 – 110 °C) en relación con el Módulo Complejo (G^*) a 45°C y 10 rad/s para cuatro tipos de asfaltos. (Fuente: Bahia & Anderson 1994)

La figura 1 es un ejemplo del efecto de las temperaturas recomendadas sobre el cambio en las propiedades de envejecimiento de los cuatro asfaltos. Los asfaltos se analizaron simultáneamente pero utilizando una temperatura determinada de envejecimiento durante el período de 20 horas de envejecimiento.

El fundamento de la utilización de PAV para reflejar en campo el envejecimiento, se deriva de la necesidad de estar lo más cerca posible a las condiciones de campo. Se debe reconocer que hay muchos factores que no pueden ser perfectamente emparejados en un ensayo de laboratorio que se destina para reflejar las condiciones de campo.



(a)



(b)

Figura 2 (a,b). Efecto de envejecimiento oxidativo en el PAV en curvas maestras reológicas de un asfalto típico –del ángulo de fase (fuente: Bahía & Anderson 1994)

Un ejemplo de uno de los asfaltos se muestra en la figura 2a y 2b. Los resultados incluyen las curvas maestras para el módulo de corte dinámico (G^*) (figura 2a) y el ángulo de fase (δ) (figura 2b) para el envejecimiento de corto plazo y con dos procedimientos diferentes de PAV.

El efecto general de envejecimiento es un aumento en el módulo complejo (G^*) y una disminución del ángulo de fase (δ) a lo largo de los rangos de frecuencia y la temperatura de aplicación. El aumento del módulo complejo (G^*) indica que el asfalto se hace más rígido y por lo tanto se deformará menos.

- **Reyes & Camacho (2008)**

La investigación adelantada sobre el efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica (Reyes, Camacho – 2008), buscan determinar los efectos de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica. El estudio parte de la caracterización de los materiales y la determinación del porcentaje óptimo de asfalto con la metodología Marshall. Fabricando muestras de módulo dinámico, de ahuellamiento y de ley de fatiga, las cuales se someten a cuatro periodos de radiación ultravioleta en una cámara con condiciones ambientales controladas. Entre los resultados obtenidos determinan que a mayor periodo de exposición de radiación ultravioleta la vida en ciclos de la mezcla disminuye, los módulos dinámicos aumentan entre 90 y 132 % y la deformación permanente aminora un 57 %, convirtiéndose así en una estructura más frágil.

Tabla 1 - Valores de la radiación solar (kwh/m²/día) en Bogotá. (fuente: Reyes, Camacho – 2008).

<i>Mes</i>	<i>Ho</i>	<i>H</i>	<i>H/Ho</i>	<i>Hb</i>	<i>Hb/H</i>	<i>Hd</i>
Enero	9.5	4.66	0.49	2.69	0.58	1.96
Febrero	10.0	4.92	0.49	2.84	0.58	2.08
Marzo	10.4	4.18	0.40	2.10	0.50	2.08
Abril	10.4	3.97	0.38	1.91	0.48	2.06
Mayo	10.1	3.71	0.37	1.72	0.46	1.99
Junio	9.8	3.56	0.36	1.63	0.46	1.93
Julio	9.9	3.76	0.38	1.78	0.47	1.98
Agosto	10.2	3.98	0.39	1.94	0.49	2.04
Septiembre	10.3	4.04	0.39	1.99	0.49	2.06
Octubre	10.1	3.89	0.39	1.91	0.49	1.98
Noviembre	9.6	3.91	0.41	2.01	0.51	1.90
Diciembre	9.3	4.20	0.45	2.31	0.55	1.89
Anual	10.2	4.06	0.41	2.07	0.51	1.99

En la Tabla 1, Ho corresponde a la Radiación Global, H a la radiación solar promedio diario, Hb a la radiación solar directa promedio diario y Hd a la radiación solar difusa promedio diario.

Esta investigación se basa en la influencia de factores ambientales locales y su afectación directa en las mezclas asfálticas, como es el caso de la radiación ultravioleta emitida por el Sol hacia la superficie terrestre. Para ello, se parte del supuesto de que dicha radiación puede causar un envejecimiento del asfalto como material ligante y por consiguiente, una modificación de las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla asfáltica.

Para determinar la relación entre el tiempo de exposición en la cámara y la radiación promedio en la ciudad de Bogotá se planteó una relación de intensidad de la radiación de la lámpara de rayos UV y la intensidad de la radiación en Bogotá.

La intensidad de radiación es la energía de radiación dividida por el producto del área de radiación por el tiempo de exposición (ecuación 1). En la investigación se determinó la relación entre las dos intensidades de radiación (ecuación 2) y se planteó una relación de energías y tiempos de exposición, como aparece en la ecuación 3.

$$I_i = \frac{E_i}{t_i \cdot A_i} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde;

I_i = Intensidad

E_i = Energía de radiación

A_i = Área de radiación

t_i = Tiempo de exposición

$$I_L = 0.0427 I_B \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde;

I_L = Intensidad de la lámpara

I_B = Intensidad de Bogotá

$$\frac{E_L}{t_L A_L} = 0.0427 \frac{E_B}{t_B A_B} \Rightarrow t_B = 0.0427 \frac{E_B t_L}{E_L} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para calcular la energía de Bogotá y la del laboratorio se utiliza la ecuación de la energía de un fotón (Ecuación 4).

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde;

E = Energía

h = Constante de Planck = $6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js

c = Velocidad de la luz

λ = Longitud de onda

Resolviendo para las ecuaciones 3 y 4, se obtiene la siguiente relación:

$$t_B = 28.5 t_L$$

Donde;

t_B = Tiempo de exposición en Bogotá

t_L = Tiempo de exposición de la lámpara

El artículo tiene como objetivo determinar el efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica con granulometría MD10, para lo cual se llevó a cabo un programa experimental con ensayos de

módulo dinámico, ley de fatiga, ahuellamiento y marshall sobre muestras expuestas a diferentes niveles de radiación.

- **Prithvi (et ál) , 1996.**

El estudio realizado por Prithvi S. Kandhal, Sanjoy Chakraborty (1996) sobre los efectos de las películas de asfalto de corto y largo plazo envejecidas de mezclas asfálticas, se realizó con el fin de cuantificar la relación entre los distintos espesores de asfalto entre las mezclas asfálticas y las características de envejecimiento de las mezclas asfálticas con el objeto de hallar el espesor óptimo deseable para garantizar una mayor durabilidad de las mezclas. Las mezclas asfálticas de espesor de 4 a 13 μm , se sometieron a procesos de envejecimiento acelerado a corto y largo plazo, procedimiento en el cual se comprobó la resistencia a la tracción, elongación, a módulo de fatiga y resistencia.

Tabla 2 - Propiedades de compactación de mezclas asfálticas envejecidas a corto y largo plazo.
(fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy, Chakraborty 1996)

Film Thickness (microns)	Resilient Modulus at 25°C, MPa			Tensile Strength at 25°C, Mpa After LTA	Tensile Strain Failure, % After LTA
	After STA ²	After LTA ¹	LTA/STA Ratio		
3.7	8,184	12,293	1.50	1.52	0.44
5.6	6,357	9,398	1.48	1.37	0.55
7.4	4,027	5,240	1.30	1.08	0.66
9.3	2,910	3,716	1.28	0.94	0.74
11.1	2,572	2,696	1.05	0.73	0.93
13.0	1,958	2,020	1.03	0.62	1.24

El módulo resiliente de las mezclas de asfalto compactadas, se midió tanto en corto como en largo plazo de envejecimiento. La mezcla suelta había sido sometida a envejecimiento de corto plazo antes de la compactación, es decir antes de la preparación de las muestras compactadas. Las muestras compactadas se sometieron entonces a envejecimiento a largo plazo. Las pruebas de módulos resilientes se llevaron a cabo a 25 ° C en el modo de tracción diametral o indirecta.

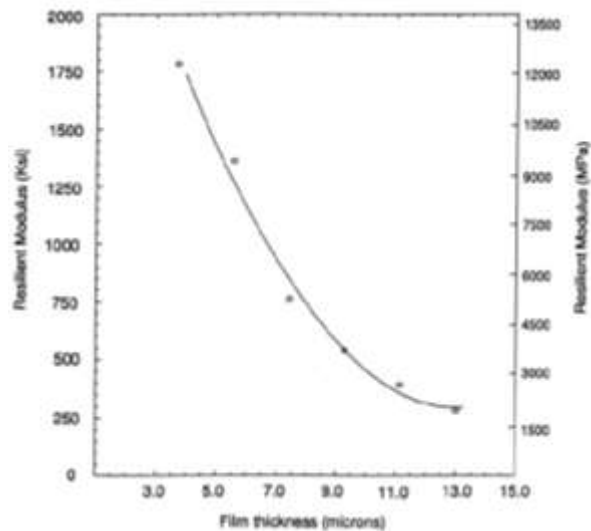


Figura 3 - Espesor de la película de asfalto vs módulo resiliente después de un envejecimiento de corto plazo. (fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy Chakraborty 1996)

Las figuras 3 y 4 muestran la relación entre el espesor de la película y los valores del módulo después de envejecimiento de corto y largo plazo, respectivamente.

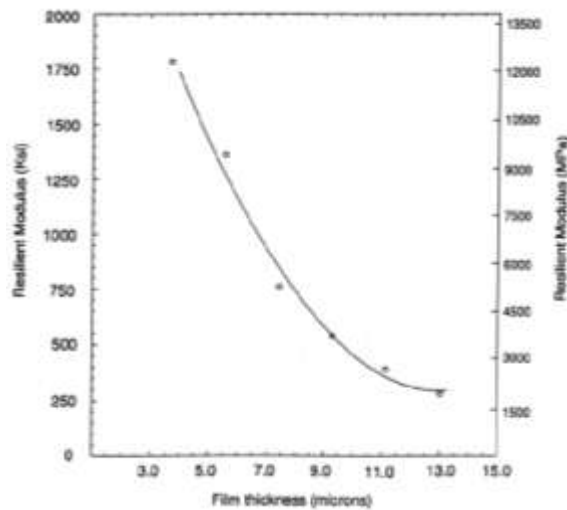


Figura 4 - Espesor de la película de asfalto frente a módulo resiliente después de envejecimiento de largo plazo. (fuente: Prithvi, Kandhal, Sanjoy Chakraborty 1996)

Adicionalmente el estudio determinó que una alta permeabilidad, los vacíos y las capas delgadas de los asfaltos en las partículas de agregados son las principales causas del envejecimiento excesivo de la carpeta asfáltica que contribuye a la escasa durabilidad de los pavimentos. Los autores reconocieron que las películas más gruesas producidas por mezclas fueron flexibles y duraderas, mientras que las películas delgadas fueron frágiles tendiendo a agrietarse, reduciendo su vida útil.

- **Vargas & Reyes (2010)**

Vargas y Reyes (2010), establecieron que las propiedades del asfalto cambian con el tiempo y debido a esto, las especificaciones utilizadas para el diseño de los pavimentos, basadas en las propiedades físicas iniciales no aseguran un buen desempeño después que el asfalto ha sido mezclado con el agregado aplicado y puesto en marcha para soportar los esfuerzos mecánicos propios del transporte. Ellos observaron que químicamente durante el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica, los asfaltos se oxidan por la acción del oxígeno del aire y de las altas temperaturas de mezclado, permitiendo que el fenómeno de envejecimiento inicie de forma inmediata y posteriormente, es inducido por los diversos factores climáticos. Con lo anterior, consideraron que para obtener carpetas asfálticas con una mayor durabilidad, se debe tener en cuenta el efecto del cambio en la composición química del cemento asfáltico en el proceso de mezclado en caliente y durante el tiempo en servicio. Para apoyarse con ésta apreciación, tuvieron que estructurar un resumen de antecedentes de los métodos de envejecimiento y de la evaluación de los asfaltos empleados por investigadores a partir del año 1903 hasta 1989. Como resultado de ésta investigación, dedujeron que en las décadas de los setenta y ochenta el uso de las pruebas de envejecimiento de asfaltos en película fina se hizo extensivo, presentándose variadas modificaciones del método hasta finales de los años ochenta. Los investigadores notaron que el nivel de envejecimiento por endurecimiento de las pruebas desarrolladas era menor que el

ocurrido bajo condiciones reales. Dentro de los métodos de evaluación empleados en estas dos décadas, se incluyen parámetros como el contenido de asfáltenos, porcentaje de oxígeno y análisis químico, así como la evaluación de los módulos elásticos, pruebas de fluencia y cálculo de la relación de módulos estimados antes y después del envejecimiento.

- **Parada, Lepesqueur & Caicedo (2003)**

En el estudio realizado sobre el envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación, verificaron las propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a edades de 1, 3, 5 y 7 años, con las siguientes condiciones:

Tabla 3 - Condiciones del envejecimiento acelerado. (Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo - 2003)

CONDICION	TEMPERATURA ° C	PRESION (PSI)	TIEMPO(Hrs)
1	110	210	20
2	90	210	20
3	110	100	20
4	90	100	10
5	110	210	15

Comparando las figuras 5 y 6, es evidenciada una oxidación rápida del cemento asfáltico en los primeros años de servicio (se aprecia una mayor separación de las curvas a diferentes edades y en las diferentes capas de las muestras), y un decrecimiento en la oxidación en los años subsiguientes.

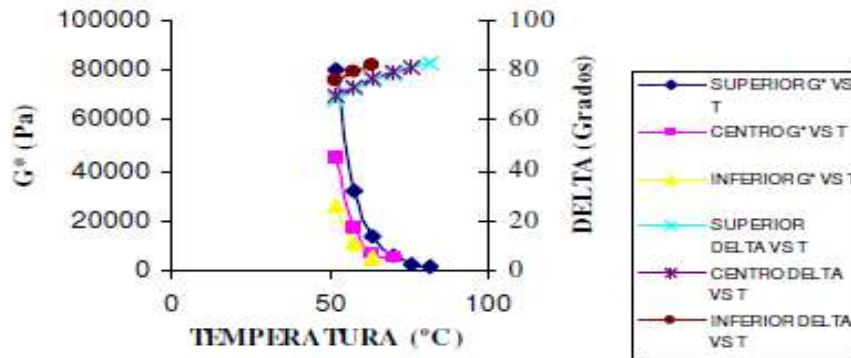


Figura 5 - Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 3 años.
(Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003)

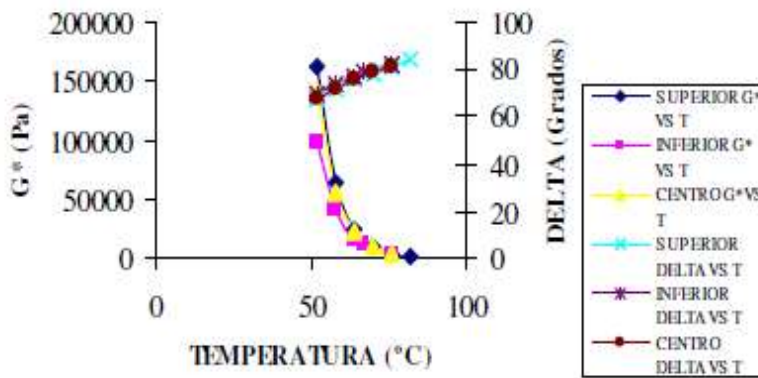


Figura 6 - Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 5 años.
(Fuente: Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003)

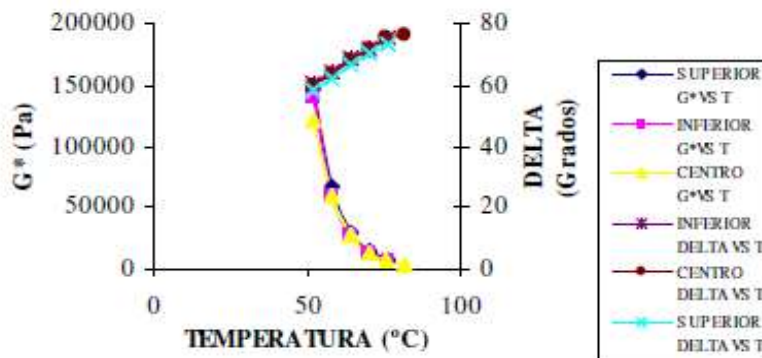


Figura 7 - Propiedades reológicas de mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 7 años.
(Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2003)

Como conclusión (en la fig.7), establecieron que la diferencia entre los valores del módulo cortante (G^*) encontrados al comparar la muestra envejecida naturalmente con los valores arrojados por el modelo aplicado es de 5% para la mezcla de 3 años de servicio y de 35% para la mezcla con 5 años de servicio.

- **Martínez & Caicedo (2005)**

En el estudio del endurecimiento por envejecimiento de ligantes y de las mezclas asfálticas realizado por Martínez & Caicedo (2005), evaluaron el efecto de la exposición de un ligante asfáltico de Barrancabermeja a radiación UV-B (siendo B la longitud de onda entre 280 y 315 nm) alterados con períodos de condensación, utilizando películas de asfalto de 2 y 1 mm de espesor y el efecto de radiación sobre un tipo de mezcla con granulometría del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU: 0/14). Para el ligante se analizaron las propiedades reológicas luego de envejecimiento de corto plazo (RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en inglés), a diferentes períodos de tiempo y para las mezclas se determinaron las propiedades reológicas a varias profundidades y de igual manera, se analizaron por varios períodos de exposición.

Este estudio consistió en comparar los resultados de envejecimiento acelerado por radiación ultravioleta de ligantes y mezclas asfálticas, con los resultados de envejecimiento por los métodos utilizados en el protocolo SUPERPAVE, determinando la profundidad de afectación de radiación ultravioleta UV-B en las propiedades reológicas de una mezcla asfáltica convencional con la granulometría IDU(0/14) para un período específico de exposición y relacionar las propiedades reológicas del asfalto presente en las mezclas asfálticas envejecidas en laboratorio con las mezclas envejecidas en servicio.

Para envejecer las muestras de ligante y las mezclas asfálticas se utilizó una cámara UV (fabricada por Atlas Instruments) y se determinó un ciclo de 4 horas para UV-B y un ciclo de 4 horas de condensación producido por vapor de agua.

Para el envejecimiento del ligante se practicaron los ensayos de envejecimiento establecidos en el SUPERPAVE. El residuo de RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en inglés) y PAV (Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés) fué caracterizado de igual manera que el asfalto original a través del DSR (Reómetro de Corte Dinámico). En esta fase se envejecieron 6 muestras colocadas en recipientes de vidrio circulares con espesores de 1 y 2 mm, con diámetro de 9 cm y una altura de 1 cm. Las muestras envejecidas se describen a continuación:

- Muestras envejecidas previamente en el RTFO de 2 mm de espesor
- Una muestra envejecida en RTFO + PAV de 2 mm de espesor
- Una muestra en estado original de 2 mm de espesor
- Una muestra envejecida en RTFO de 1 mm de espesor.

Se estudió un periodo de envejecimiento de 504 horas equivalentes a 21 días. Se analizó el comportamiento reológico de las muestras envejecidas en la cámara UV-B para varios períodos de exposición: 1 muestra de RTFOT a 168 horas de envejecida, una muestra RTFOT a 336 horas de envejecida, una muestra RTFOT a 504 horas de envejecida y una muestra RTFOT+PAV, original y RTFOT de 1 mm a 504 horas cada una.

Para estudiar el efecto de envejecimiento en las mezclas, se buscó un resultado que fuera comparable con una vía de prueba dentro de un proyecto de investigación con el IDU. Las probetas con diámetro de 10 cm y 6 cm de alto, fueron cortadas con el fin de obtener muestras cilíndricas de 1 y 2.5 cm de espesor. Las mezclas de 2.5 cm fueron expuestas durante un período de 504

horas de UV-B y condensación. El objetivo de envejecer estas muestras con el espesor de 2.5 cm, fue determinar la profundidad de afectación de la radiación UV-B.

Para poder determinar las propiedades reológicas a cuatro profundidades fue necesario obtener tajadas cada 5 mm de espesor. Con el fin de evitar la pérdida de material por efecto de la abrasión del corte, se obtuvieron tajadas a la profundidad de 5 mm y 15 mm de dos muestras y de las muestras restantes se obtuvieron tajadas a profundidades de 10 mm y 20 mm. De las tajadas obtenidas a través de una centrifuga se separó el solvente mas asfalto de los áridos. Las muestras de 1 cm de espesor fueron sometidas a períodos de exposición de 168, 336 y 504 horas. Luego de practicar la extracción del asfalto a todas las muestras se sometieron a caracterización reológica a través del DSR.

A continuación se muestran los resultados de la caracterización física y reológica del asfalto en estado original y envejecido en RTFOT y PAV (Figuras 8 y 9), estos resultados sirven de base para el análisis comparativo con el envejecimiento UV-B.

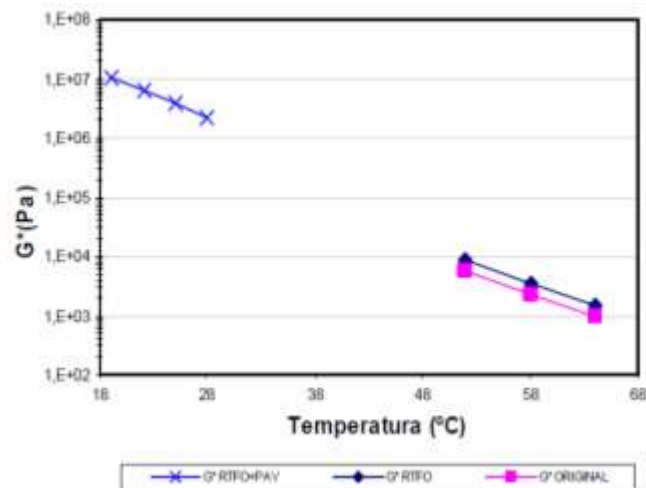


Figura 8 - Módulo complejo G^* del ligante original, residuo RTFOT y residuo PAV a frecuencia constante de 10 rad/seg.(Fuente: Martinez & Caicedo, 2005)

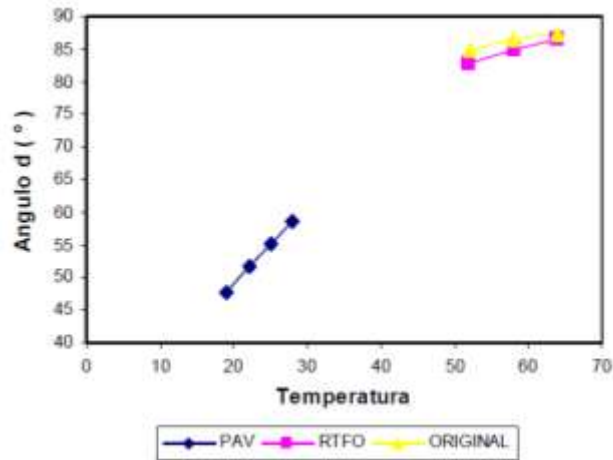


Figura 9 - Ángulo de fase (δ) del ligante original residuo RTFOT y residuo PAV a frecuencia constante de 10 rad/seg.(Fuente: Martinez & Caicedo, 2005).

Se utilizó como indicador del envejecimiento, la relación de envejecimiento (RE) que obedece a módulo complejo después y antes del envejecimiento (Khalid,2002). De la figura 11, se destaca la curva del asfalto envejecido RTFOT + 504 h UV-B con espesor de 1mm, la cual presenta un valor más alto del módulo de corte (G^*), cercano a 23000 Pa a 52°C y el asfalto envejecido en RTFOT + UV-B 504 h con espesor de 2mm, que presenta una diferencia en el valor del módulo complejo de 9000 Pa, representado para RTFO + UVB 504 h de 2mm, RE = 4 y para las muestras RTFO + UV-B 504 h de 2mm, RE = 2.45 para 52°C. Por lo anterior, se puede concluir que para el asfalto 80 – 100, envejeciéndolo a 504 h en la cámara ultravioleta, se puede obtener un efecto reológico similar que en la prueba RTFOT. Adicionalmente, cuando se cuenta con un ángulo de fase (δ) inferior y el módulo complejo (G^*) es proporcional, indica que el asfalto se vuelve más rígido.

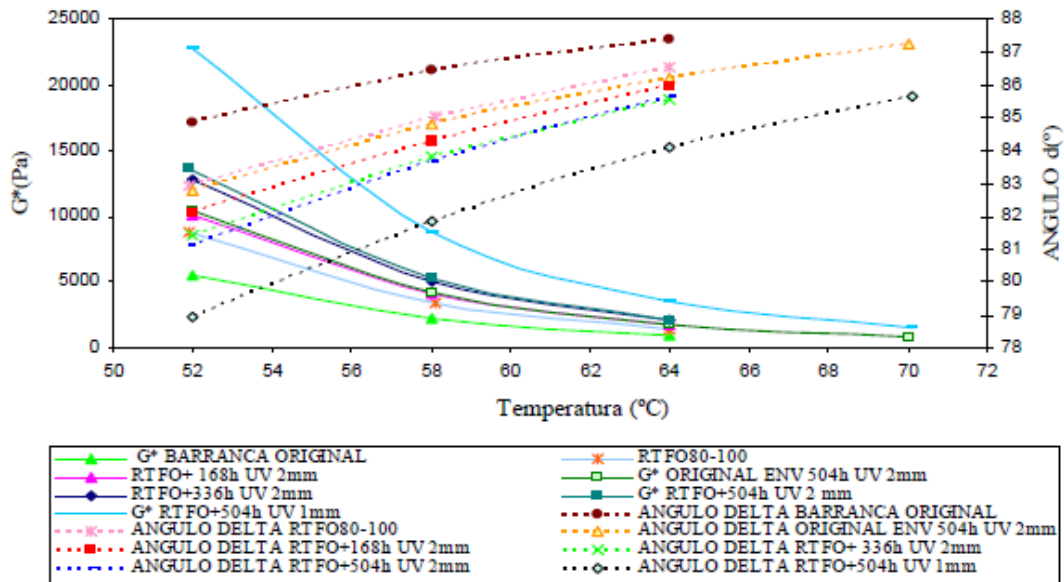


Figura 10 - Módulo complejo (G^*) vs Temperatura del asfalto envejecido en cámara UV-B. (Fuente: Martínez & Caicedo, 2005).

Además se registra en la figura 10, la degradación sufrida en el módulo del asfalto a lo largo de los diferentes períodos de exposición a radiación; mientras que en la tabla 4, se muestran los resultados de la caracterización reológica.

Tabla 4 - Resultados obtenidos de la caracterización reológica del ligante (Fuente: Martínez & Caicedo, 2005).

ASFALTO BARRANCA PEN 80-100								
Temp $^{\circ}\text{C}$	Propiedad	Original	RTFO	RTFO+168h UVB	RTFO+336h UVB	RTFO+504h UVB	Original + 504h UVB	RTFO+504h UVB
			espesor 2mm		espesor 2mm	espesor 2mm	espesor 2mm	
52	G^* Pa	5570.0	8750.0	10120.0	12760.0	13670.0	10500	22790
	δ grados	84.9	82.9	82.1	81.4	81.1	82.77	78.92
	$G^*/\text{sen } \delta$ KPa	5.5	8.8	10.2	12.9	13.5	10.41	22.36
	RE	1.0	1.6	1.8	2.3	2.5	1.89	4.09
58	G^* Pa	2254.0	3405.0	4095.0	5101.0	5253.0	4171	8833
	δ grados	86.4	85.0	84.3	83.8	83.7	84.82	81.86
	$G^*/\text{sen } \delta$ KPa	2.3	3.4	4.1	5.1	5.2	4.154	8.744
	RE	1.0	1.5	1.8	2.3	2.3	1.85	3.92
64	G^* Pa	996.8	1434.0	1751.0	2119.0	2147.0	1759	3531
	δ grados	87.4	86.6	86.0	85.6	85.6	86.23	84.12
	$G^*/\text{sen } \delta$ KPa	1.0	1.4	1.8	2.1	2.1	1.755	3.513
	RE	1.0	1.4	1.8	2.1	2.2	1.76	3.54

RE: Relación de Envejecimiento G^ envejecido / G^* original

Para el envejecimiento de mezclas asfálticas, se obtuvieron los resultados relacionados en la tabla 5 de la caracterización reológica mediante barrido de

temperatura a frecuencia constante, obtenido del envejecimiento UV-B a 504 horas analizados para las 4 profundidades estudiadas.

Tabla 5 - Resultados obtenidos de la caracterización del ligante recuperado para 52, 58 y 64°C luego de 504h de envejecimiento en UV-B. (Fuente: Martínez & Caicedo,2005).

Temp °C	Propiedad	MEZCLAS DE 1 CM ASFALTO BARRANCA PEN 80-100					MEZCLAS DE 2.5 CMS ASFALTO BARRANCA PEN 80-100						
		Original	NO ENV	168	336	504	Original	NO ENV	Profundidad de muestra				
									0-5 mm	5-10mm	10-15mm	15-20mm	
52	G* Pa	5570	8925	15660	25500	30170	5570	8925	28710	23700	18460.00	9894.00	
	d grados	84.87	81.84	75.68	74.02	72.68	84.87	81.84	75.17	77.2	77.87	80.86	
	G*/sen d KPa	5.548	9.02	16.17	26.52	31.60	5.55	9.02	29.7	24.3	18.88	10.02	
	RE	1.0	1.6	2.8	4.6	5.4	1.0	1.6	5.2	4.3	3.31	1.78	
58	G* Pa	2254.0	3763.0	6725	10945	12950	2254.0	3763.0	12040	10010	7841.00	4412.00	
	d grados	86.4	84.7	6.86	77.03	76.07	86.4	84.7	78.53	80.09	80.74	83.17	
	G*/sen d KPa	2.3	3.78	78.59	11.23	13.34	2.3	3.78	12.28	10.16	7.95	4.44	
	RE	1.0	1.7	3.0	4.9	5.7	1.0	1.7	5.3	4.4	3.48	1.96	
64	G* Pa	996.8	1760.0	3055.0	4527	5622	996.8	1760.0	5150	4331	3458.00	2028.00	
	d grados	87.4	85.89	81.2	80.01	79.23	87.4	85.89	81.48	82.58	83.08	84.99	
	G*/sen d KPa	1.0	1.8	3.1	4.60	5.72	1.0	1.8	5.21	4.37	3.48	2.04	
	RE	1.0	1.8	3.1	4.5	5.6	1.0	1.8	5.2	4.3	3.47	2.03	

Como se puede observar en la figura 11, el mayor valor de módulo complejo (G*) es de 28700 Pa a 52°C para una profundidad de 5 mm y el ángulo de fase (δ) más bajo es de 75.17°, lo que muestra que el efecto de radiación UV-B es mucho más intenso en los primeros milímetros.

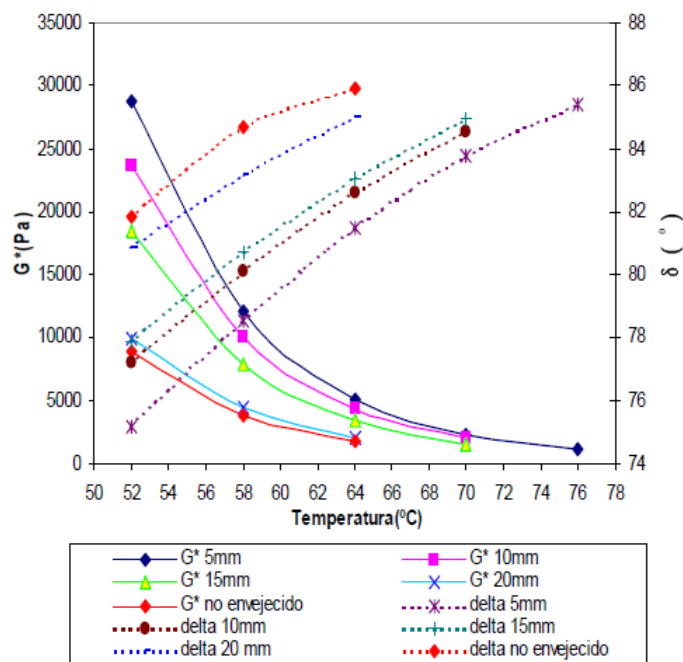


Figura 11 - Gráfica de módulo complejo (G^*) vs Temperatura del asfalto recuperado de la mezcla a 4 profundidades. (Fuente: Martínez & Caicedo, 2005).

Los módulos por debajo de los 5mm iniciales disminuyen y el ángulo de fase (δ) aumenta con la profundidad. A 20 mm de profundidad el comportamiento del ligante de acuerdo con el módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) es similar al obtenido al del asfalto recuperado de una muestra sin envejecer y a su vez similar al de RTFOT. Basados en lo anterior, los autores concluyeron que la radiación UV-B alcanzó afectar durante las 504 horas hasta la tajada de mezcla comprendida entre 10 y 15 mm.

- **Rondón , Reyes y Vacca (2010)**

En la investigación adelantada por Rondón H, Reyes F y Vacca H (2010), presentan el cambio que experimentan el módulo resiliente, la deformación vertical permanente y la ley de fatiga de una mezcla asfáltica al ser expuesta a las condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá D.C.(Colombia), durante 29 meses.

En Colombia son escasas las investigaciones que se han realizado sobre el fenómeno de fatiga en mezclas asfálticas, debido ante todo a la falta de equipos apropiados para llevar a cabo mediciones en campo y en laboratorio y al escaso presupuesto destinado para actividades de investigación (Rondón H, Reyes F y Vacca H, 2010). El artículo presenta un estudio que tiene como objeto evaluar dichas influencias de una mezcla densa en caliente tipo MDC-2, según las especificaciones del Instituto Nacional de Invías. Se optó por utilizar éste tipo de mezcla ya que son las más utilizadas en Colombia para conformar capas de rodadura, las cuales son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente. (Rondón H, Reyes F y Vacca H , 2010).

Tabla 6 - Promedios Meteorológicos mensuales para la ciudad de Bogotá D.C. (Fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).

Mes	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	Precipitación diaria (cm)
Enero	6	20	2,06
Febrero	7	20	3,30
Marzo	8	20	4,73
Abril	9	19	6,74
Mayo	9	19	7,20
Junio	9	18	3,83
Julio	8	18	3,43
Agosto	8	18	3,00
Septiembre	8	19	4,64
Octubre	8	19	9,03
Noviembre	8	19	6,08
Diciembre	7	19	3,80

En la tabla 6 se muestra cómo fueron escogidas las temperaturas, debido principalmente a que la ciudad se encuentra en una zona donde se presentan las siguientes condiciones ambientales en un día determinado: predominio de clima frío con temperaturas mínimas y máximas promedio de 6°C y 20°C, humedad entre 60 y 100%, presencia de lluvias periódicas en cualquier momento del día y altura sobre el nivel del mar de 2.640 m. (Rondón H, Reyes F y Vacca H , 2010).

Luego de implementar los ensayos correspondientes de módulo resiliente y fatiga, se presentan los resultados de las pruebas:

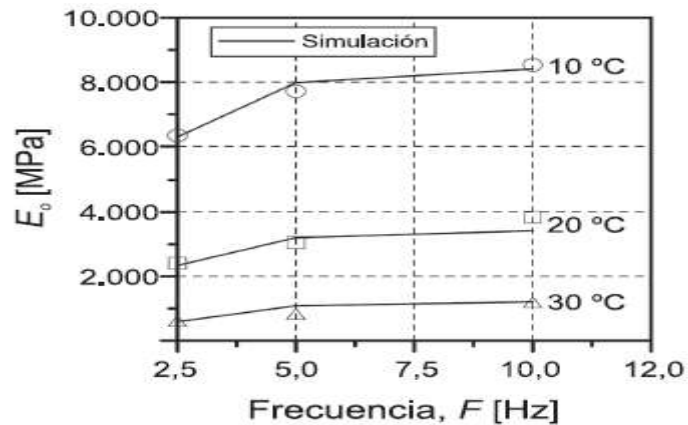


Figura 12 - Evolución del módulo resiliente inicial e_0 de la mezcla MDC-2 con la temperatura T y la frecuencia de carga F . (fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).

En la figura 12 se observa un incremento típico del módulo cuando se incrementa la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo. Esta evolución puede ser presentada matemáticamente mediante la ecuación empírica (1) en donde E_0 , T y F son MPa, °C y Hz respectivamente. (Rondón H, Reyes F y Vacca H, 2010).

$$E_o = \left[\frac{k_1 \sqrt{T} F^2 + k_2 \sqrt{T} + k_3 F^2 + k_4}{\sqrt{T} F^2} \right] \quad (1)$$

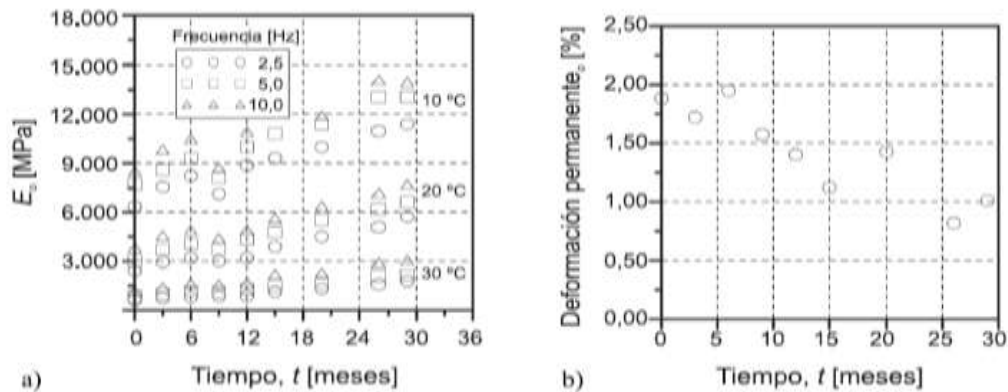


Figura 13 - a) Evolución del módulo resiliente E_r con el tiempo de exposición T . b) Evolución de la deformación permanente vertical con el tiempo de exposición T . (fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010).

En la figura (13 a), para el caso de la mezcla analizada, el módulo tiende a aumentar con el tiempo de exposición al ambiente y por lo tanto, la resistencia a la deformación permanente aumenta (figura 13 b). Este fenómeno puede ser debido ante todo al envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico por efectos del agua, el aire, la temperatura y la exposición a radiación ultravioleta. (Rondón, Reyes y Vacca, 2010).

- **Bell, (et ál), 1994.**

En la investigación de la selección de los procedimientos de laboratorio de envejecimiento para las mezclas de asfalto-agregado (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994), parten de dos hipótesis importantes. Dos efectos principales dominan el envejecimiento de las mezclas de asfalto-agregado:

1. Pérdida de componentes volátiles y oxidación en la fase de construcción (a corto plazo de envejecimiento).
2. La oxidación progresiva de la mezcla en el lugar en el campo (largo - plazo de envejecimiento).

Otros factores pueden contribuir al envejecimiento. En particular, la estructuración molecular puede ocurrir durante un largo período de tiempo, resultando en endurecimiento estérico. La luz actínica, principalmente en el rango ultravioleta, también tiene un efecto, particularmente en climas desérticos. (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

El envejecimiento resulta de endurecimiento (rigidización) de una mezcla, lo que altera su funcionamiento. Esto puede ser beneficioso, entre mas rígidas las mezclas, mejoran las propiedades de distribución de carga y son más resistentes a la deformación permanente (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994). Sin embargo, el envejecimiento también puede resultar en fragilidad (aumento de la tendencia a agrietarse y fracturarse) y la pérdida de durabilidad en términos de resistencia al desgaste y susceptibilidad a la humedad. (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

Los datos procedentes de pruebas de envejecimiento del horno a corto plazo (Figura 14) muestran que el envejecimiento significativo se produce, como se indica por un aumento en el módulo con el tiempo de envejecimiento. Cuando una temperatura de 163 ° C (325 ° F) se utiliza, la relación de módulos para muestras mayores de 15 h es menor que la proporción de muestras mayores durante 6 h. Esta disparidad se atribuyó al envejecimiento severo de la película de asfalto en la mezcla de recubrimiento y la incapacidad para compactar estas muestras adecuadamente después del envejecimiento.

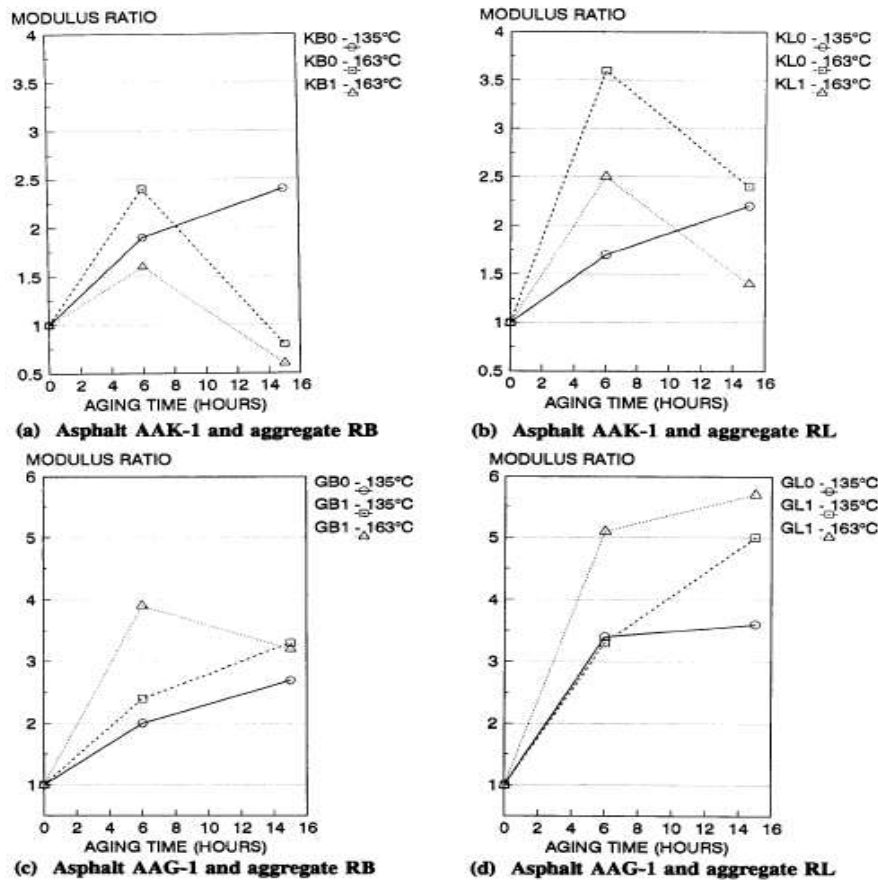


Figura 14 - Resultados del horno de envejecimiento de corto plazo. (Fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

La figura 14, también muestra que los niveles de vacío de aire de estas muestras eran mucho más altos que los niveles de ambas muestras sin envejecer y las muestras envejecidas a 135 ° C (275 ° F). La compactación de todas las muestras se realizó a 120 ° C (248 ° F), como se hizo con las muestras sin envejecer. Es más apropiado utilizar una temperatura de compactación equiviscosa en futuros estudios que utilizan este método de envejecimiento (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994). Además, con posterioridad a RTFO se hace sólo a una temperatura de 135 ° C (275 ° F), con un tiempo máximo de 4 horas como se recomienda por Von Quintus et al. (1988). Una ventaja de este enfoque es que

varias bandejas de material pueden ser mayores, al mismo tiempo. (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

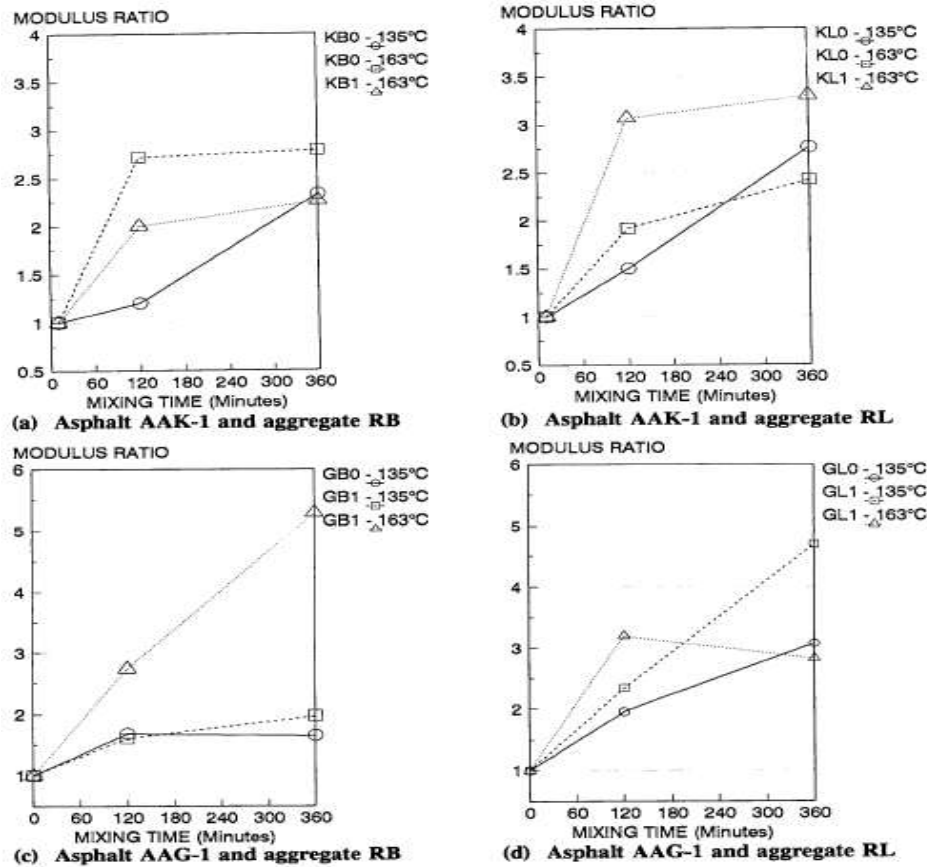


Figura 15 - Resultados de extendido de mezcla. (Fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

Los datos de las pruebas extendidas de mezcla (Figura 15) muestran los aumentos de envejecimiento con el tiempo, como se indica mediante el aumento de la relación de módulos. Niveles similares de aumento de la relación de módulos se lograron en estas pruebas y las pruebas de envejecimiento del horno. Aunque estos ensayos tuvieron éxito en la consecución de envejecimiento significativo, con el fin de ser viable para las pruebas de producción, varios hornos sería necesarios, o modificaciones significativas tendría que hacerse en el horno de película delgada de rodadura. (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

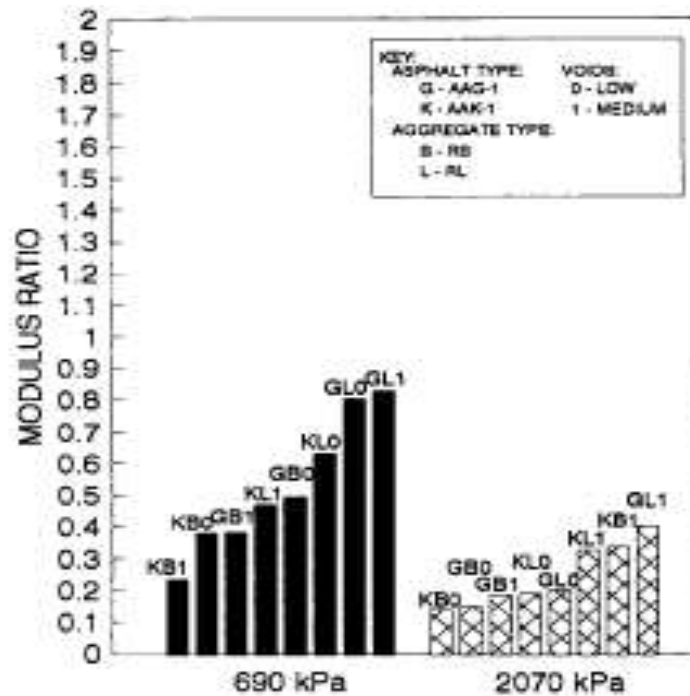


Figura 16 - Efecto de la presión de oxidación con presión de aire comprimido (Fuente: Bell, Abwahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

El recipiente de presión-oxidación con aire comprimido produce resultados similares a la vasija de presión-oxidación con oxígeno (los resultados se muestran en la Figura 16). Las muestras sometidas a las condiciones extremas de 60 °C (140 ° F) y 2070 kPa (300 psi) durante siete días experimentó el mayor deterioro. (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

Los resultados del programa de prueba de presión de oxidación de oxígeno y aire comprimido muestran una tendencia general de disminución de módulo con el incremento de la severidad del tratamiento. Esta es una tendencia contraria a la esperada y se atribuye a la interrupción de la muestra cuando la presión del gas se alivia. Las modificaciones del procedimiento de prueba puede mejorar esta situación, pero una técnica de baja presión es preferible (Bell, AbWahab, Cristi, Sosnovske, 1994).

3. MARCO CONCEPTUAL

La investigación relaciona una amplia terminología técnica que hace parte de los procesos que se llevan a cabo en el fenómeno de envejecimiento de los ligantes y las mezclas asfálticas. En los siguientes párrafos, se citarán algunas de las descripciones más importantes a tener en cuenta.

3.1 ASFALTO

El asfalto es un material bituminoso de color negro, constituido principalmente por asfáltenos, resinas y aceites, elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementantes a temperaturas ambientales normales. Los asfaltos pueden tener dos orígenes; los derivados de petróleos y los naturales.

Los asfaltos derivados del petróleo son los que se obtienen por medio de un proceso de destilación industrial del crudo. La mayoría de los petróleos crudos contienen algo de asfalto y a veces casi su totalidad, sin embargo, existen algunos petróleos crudos, que no contienen asfalto. En base a la proporción de asfalto que poseen, los petróleos se clasifican en: petróleos crudos de base asfáltica, petróleos crudos de base parafínica y petróleos crudos de base mixta (contienen parafina y asfalto).

El asfalto procedente de ciertos crudos ricos en parafina, no es apto para fines viales por cuanto se precipita a temperaturas bajas, formando una segunda fase discontinua, lo que da como resultado, propiedades indeseables como la pérdida de ductilidad. Con los crudos asfálticos esto no sucede, dada su composición. El petróleo crudo extraído de los pozos, es sometido a un proceso de destilación en

el cual se separan las fracciones livianas como la nafta y kerosene de la base asfáltica mediante vaporización, fraccionamiento y condensación de las mismas.

Los asfaltos naturales provienen de depósitos donde suelen formarse en pozos o lagos a partir de residuos de petróleo que rezuman hacia la superficie a través de fisuras en la tierra. También se aprovechan los depósitos de rocas asfálticas o rocas impregnadas de asfalto.

Sus características físicas más relevantes son la viscosidad, su adherencia y su intenso color negro; su uso primordial se da como aglomerante en mezclas asfálticas para la construcción de vías, ya que es capaz de unir fragmentos de varios materiales y dar cohesión al conjunto a través de transformaciones en su propia masa que dan lugar al origen de nuevos compuestos.

3.2 OXIDACIÓN

La oxidación es el fenómeno en el cual el oxígeno actúa sobre los constituyentes más reactivos del asfalto manifestándose principalmente como endurecimiento, pérdida de la consistencia viscoelástica, fisuración y agrietamiento del asfalto. Algunos asfaltos envejecen más rápido y se endurecen más que otros. Este hecho resulta en la necesidad de caracterizar la resistencia de los asfaltos a la oxidación, para luego tener en cuenta esta resistencia a la hora de seleccionar asfaltos para pavimentos y predecir su comportamiento en el largo plazo. El envejecimiento de una mezcla asfáltica, se manifiesta por la pérdida de las propiedades físicoquímicas del material. Los asfaltos experimentan durante el tiempo de mezclado y servicio un proceso de oxidación debido a factores como temperatura, presión y tiempo (Parada, Lepesqueur & Caicedo, 2005).

Por otro lado, Puello y Nikolaevna (1995), relacionan que el asfalto está compuesto por una mezcla compleja de hidrocarburos, la temperatura hace que la

composición química cambie gradualmente, haciendo que a la vez cambien las propiedades físicas que torna el asfalto de una consistencia semisólida a fluida. Esto, unido a las reacciones de oxidación de los componentes del asfalto cuando interaccionan con el oxígeno de las atmósfera, constituyen el fenómeno conocido como envejecimiento oxidativo de los asfaltos, el cual determina los cambios físicoquímicos que a su vez son la base para la caracterización de los ligantes.

Youtcheff y Jones (1994) definieron el envejecimiento oxidativo como la reacción de grupos lábiles del asfalto como el oxígeno; sin embargo, este proceso involucra otros cambios a nivel estructural.

3.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS ASFALTOS

El envejecimiento en los asfaltos, se manifiesta de manera física y química. En donde la primera se ve reflejada en las fisuras y/o agrietamientos, provocados por altas sollicitaciones de carga (abundante tráfico vehicular), factores climáticos, drásticos cambios de temperatura y el tiempo. La manifestación química de los asfaltos, tiene que ver con las alteraciones que experimentan las propiedades moleculares de los asfaltos principalmente en los compuestos de carbono e hidrógeno denominado como hidrocarburos.

3.4 ENVEJECIMIENTO DE CORTO PLAZO (ENSAYO RTFOT)

Se llama envejecimiento de corto plazo al ensayo normativizado de película o lámina delgada, bajo la norma del Invías E-720-07 y se realiza mediante el equipo de horno rotatorio RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en inglés).



Figura 17 - Horno Rotatorio de Película Delgada. (Fuente: Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana)

Este horno está diseñado exclusivamente para el ensayo de película delgada, que simula los cambios en las propiedades del asfalto para una mezcla convencional.

Para éste ensayo se requieren 8 recipientes cilíndricos en vidrio que deben contener un promedio de asfalto de 35 g cada uno. Luego, se deben ingresar horizontalmente en cada uno de los orificios que contiene el carro o rueda interna del horno giratorio. A partir de ese momento se debe cerrar la compuerta de protección y se indica en el equipo el control de tiempo correspondiente a 85 minutos y de temperatura a 163 °C.

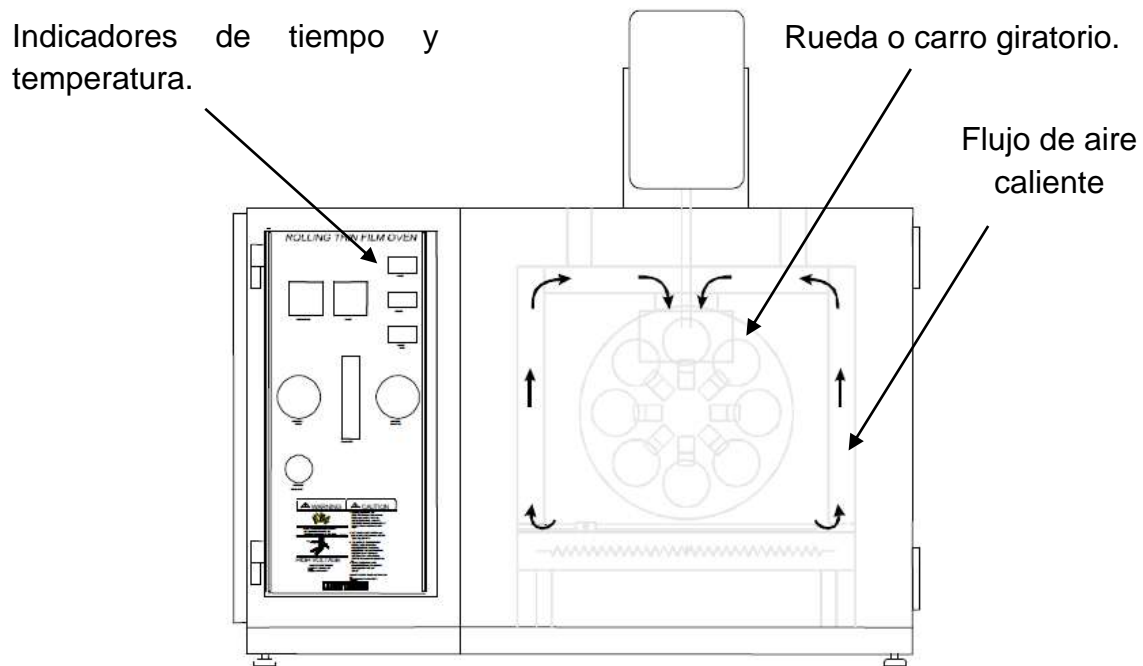


Figura 18 - Circulación de flujo de aire forzado. (Fuente: Manual de instrucciones rolling thin film oven)

Durante éste tiempo y temperatura, el carro girará horizontalmente (ver figura 18) mediante la aplicación de un flujo de aire caliente con presión y velocidad constantes.

El ensayo de RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en ingles), simula un envejecimiento de corto plazo en campo, cuyo efecto corresponde a las primeras horas de fabricación de la mezcla asfáltica, transporte, colocación y compactación de la misma. El tiempo estimado de envejecimiento de corto plazo en campo, está condicionado para tres horas desde el momento en que se retira de la planta de producción hasta la colocación y compactación en obra (planta de asfaltos Concescol).

3.5 ENVEJECIMIENTO DE LARGO PLAZO (ENSAYO PAV).

Se llama envejecimiento de largo plazo, al deterioro de la carpeta asfáltica ocasionado durante su vida útil producto del tiempo, factores climáticos, temperatura y/o servicio de la vía.

El ensayo PAV (Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés) se rige por las especificaciones SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements, por sus siglas en inglés), las cuales establecen que para ejecutar dicho ensayo, las muestras deben haber pasado primero por RTFOT.



Figura 19 - Equipo PAV. (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana)

Este ensayo simula el envejecimiento por oxidación del ligante asfáltico en una mezcla convencional equivalente a un período de servicio entre 7 y 10 años.

Es necesaria la utilización de 10 bandejas metálicas, cada una con 50 g de asfalto (envejecido en RTFOT) que serán ingresadas en una cámara donde se generan presiones sobre la muestra y a su vez se expone la misma a una temperatura elevada (ver figura 19). La presión regulada corresponde a 2.1 MPa y la temperatura regulada esta en un rango entre 90° y 110° C.

La prueba de PAV (Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés), simula el envejecimiento por oxidación a largo plazo de los ligantes asfálticos en una mezcla convencional equivalente a un período de servicio entre 5 y 10 años (según norma INV E – 751-07) sin embargo, la literatura señala que la simulación se aproxima a un período de servicio de 7 años.

3.6 DIFERENCIAS ENTRE LOS ENVEJECIMIENTOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE CORTO Y DE LARGO PLAZO.

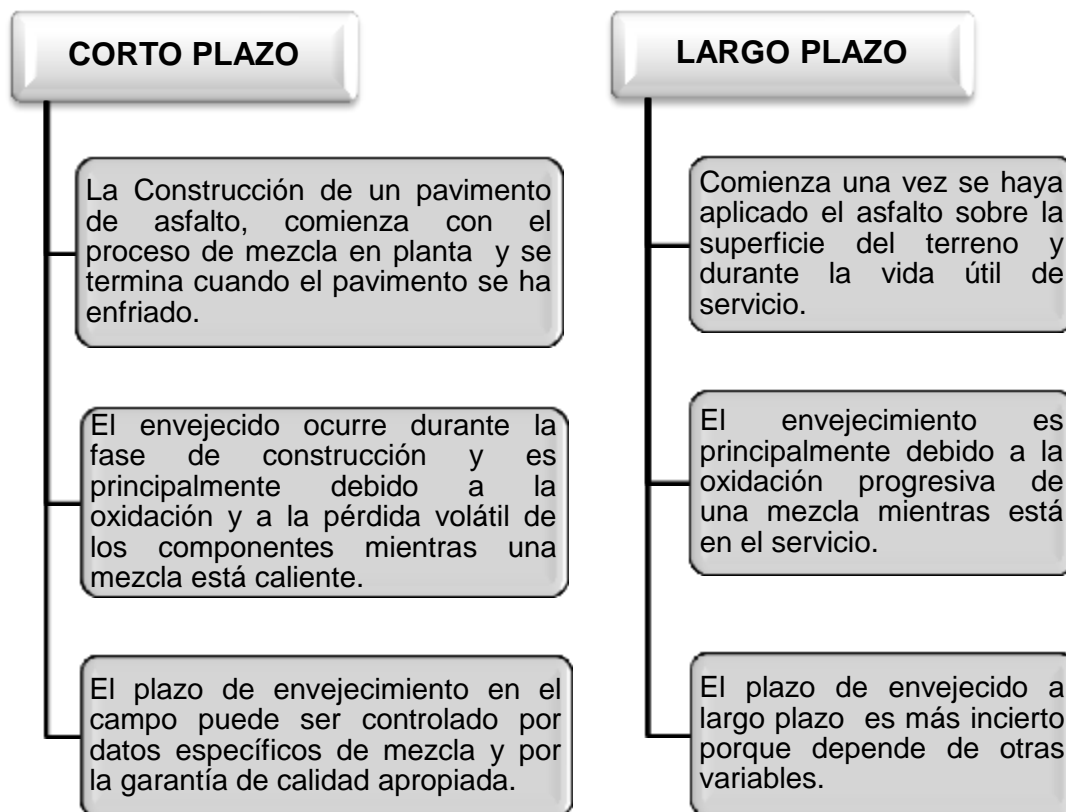


Figura 20 - Diferencia de envejecimiento de Corto y de Largo Plazo (Presentación propia de los Autores)

3.7 REOMETRO DE CORTE DINÁMICO – DSR

Según la norma del Instituto Nacional de Vías (I.N.V. E – 750 – 07), correspondiente al reómetro de corte dinámico (DSR), el procedimiento se usa para medir el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) de ligantes asfálticos, cuando es ensayado al corte dinámico (oscilatorio) utilizando una geometría de prueba de platos paralelos. Es aplicable a ligantes asfálticos con valores de módulo de corte dinámico de 100 Pa a 10 MPa con rangos entre 6 y 68°C, sin embargo, para fines de la presente investigación se utilizarán los rangos de temperatura contemplados de la norma PG (grado de desempeño del ligante asfáltico) que serán explicados en el capítulo de metodología. Este método de prueba está normativizado y pensado para determinar las propiedades lineales viscoelásticas de ligantes asfálticos, para requerimiento de especificación y no como un procedimiento para comprender la caracterización completa de las propiedades viscoelásticas del ligante (Instituto Nacional de Vías, norma: I.N.V. E – 750 – 07).



Figura 21 - Equipo DSR (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la pontificia universidad javeriana)

3.8 RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación solar posee tres grandes clases de ondas de acuerdo con sus longitudes: ultravioleta (UV), visible (VIS), e infrarroja (IR). La longitud de onda de los rayos ultravioleta está entre 295 y 400 nm y representa aproximadamente un 7% de la radiación total. Una de las estaciones meteorológicas de la ciudad de Bogotá está ubicada en las coordenadas 04°09' N y 79°09' W y a una altura de 2.546 msnm, donde la longitud de onda de los rayos ultravioleta es aproximadamente de 305 nm (tomado de: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2002/buenos_aires/radiacion/tipos.htm).

La radiación ultravioleta se divide en tres tipos, UVC, UVB y UVA, donde el tipo C (UVC) es absorbida totalmente por la capa de ozono (Ver tabla 7).

Tabla 7 - Longitud de rayos ultravioleta

Tipo	Longitud de la onda (nm)
UVA	315 – 400
UVB	280 – 315
UVC	< 280

Por lo que la superficie terrestre solo alcanza a llegar dos clases de radiación ultravioleta UVB y UVA. A continuación se hace una descripción gráfica y clasificación por cada tipo de radiación ultravioleta:

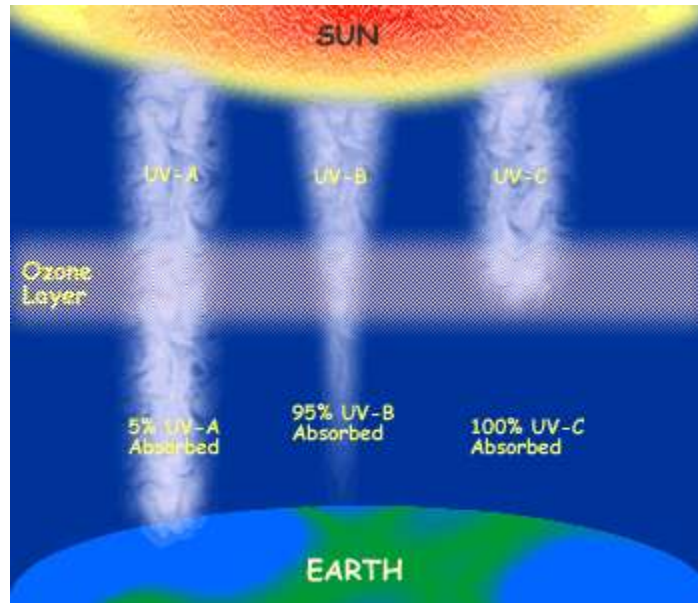


Figura 22 -Tipos de rayos ultravioleta (fuente: tomado de <http://rainforestradio.com>)

La cámara de envejecimiento acelerado mediante radiación UV y condensación, instalada en el laboratorio es para exposición alternada de materiales a radiación ultravioleta fluorescente y condensación (sin radiación), donde la energía radiante UV se concentra en las lámparas fluorescentes en la región de la longitud de onda debajo de 350 nm.

3.9 MÓDULO RESILIENTE

Como parte de la evaluación dinámica de la presente investigación, está el ensayo de módulo resiliente que busca medir la deformación permanente del material asfáltico con la aplicación de los ciclos de carga.

La deformación resiliente o elástica son de recuperación instantánea y suele denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la carga. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye,

hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales. La muestra llega así a un estado tal en que toda la deformación es recuperable, en ese momento se tiene un comportamiento resiliente (Moreno, 2011).

Los valores del módulo resiliente pueden emplearse para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. Así mismo, el resultado del módulo puede emplearse para estudiar efectos de temperatura, rata de carga y periodos de reposo entre otros factores que pueden ser tenidos en cuenta (Moreno, 2011).

Puesto que el procedimiento para hallar el módulo es no destructivo, los ensayos pueden repetirse sobre un mismo espécimen para evaluar su condición en lo que respecta a la temperatura o humedad.

3.10 ESPECTROSCOPIA

La espectroscopía es el estudio de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia, con absorción o emisión de energía radiante.

El objetivo de la espectroscopía es caracterizar la luz proveniente de un objeto de acuerdo a las longitudes de onda que la componen. El resultado de la espectroscopía es una curva de intensidad como función de la longitud de onda, llamada espectro. El espectro depende de la composición y otras propiedades del objeto. La longitud de onda de la luz absorbida o emitida por un cuerpo depende esencialmente de las interacciones entre niveles de energía de los objetos que componen el cuerpo y la energía de los fotones de la luz. Los niveles de energía de interés pueden ser de los electrones orbitales externos de los átomos en el caso de la luz visible, de los electrones orbitales profundos en el caso de los rayos X, de vibración de las moléculas en espectroscopía infrarroja (Universidad Técnica Francisco Santa María, 2006).

3.11 MÉTODO S.A.R.A.

Este método es utilizado en la composición química de los ligantes, establecido por medio del fraccionamiento en saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos. Dentro de los componentes del asfalto, existen separaciones que pueden ser evaluadas usando diferentes solventes. Para ello, es necesario utilizar algunos métodos cromatográficos muy comunes como el método de Corbett o de Rostler (1969).

De estas fracciones, los asfáltenos son más pesados y corresponde a la fracción soluble en tolueno e insoluble en heptano. Por tal motivo tiene un interés particular, ya que a ella se atribuyen características estructurales de los asfaltos, como dureza y resistencia.

4. METODOLOGÍA

En la presente investigación, se contempla un primer análisis desde el punto de vista de envejecimiento de largo plazo (pasando por envejecimiento de corto plazo RTFO) para los asfaltos colombianos originales 60-70 y 80-100, mediante la Cámara de Envejecimiento a Presión (PAV), con tiempos de envejecimiento de 20 y 50 horas. Un segundo análisis, se contempla para las mezclas asfálticas 60-70 y 80-100 (MDC-2), con envejecimiento por Cámara Ultravioleta, simulando tiempos de exposición en campo (de 20 a 1000 horas) bajo condiciones de radiación y condensación.

Utilizando la Norma Inviás E-751-07, que define el procedimiento de envejecimiento acelerado de largo plazo para los asfaltos originales, se envejecen los residuos de asfalto provenientes de RTFO (RTFO: Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en inglés) en la cámara de envejecimiento a presión (PAV: Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés), retirando posteriormente el nuevo residuo PAV y sometiéndolo a evaluación reológica a través del equipo de Reómetro de Corte Dinámico (DSR). Este ensayo se desarrolla para las muestras envejecidas, provenientes de PAV a 20 y a 50 horas.

En cuanto al procedimiento experimental desarrollado para las mezclas asfálticas ya establecidas, fue necesaria la fabricación de las briquetas de módulo dinámico (10 cm x 20 cm) y módulo resiliente (10 cm x 7 cm) mediante las recomendaciones de las normas INVIAS Y SUPERPAVE y luego someterlas a distintos tiempos de exposición en la cámara UV (20, 50, 100, 200, 500 y 1000 Horas). Tanto la evaluación química como la evaluación dinámica de las mezclas asfálticas, se realiza toda vez que han pasado por los distintos tiempos de exposición en cámara UV. *(El resumen metodológico se representa en la figura 23)*

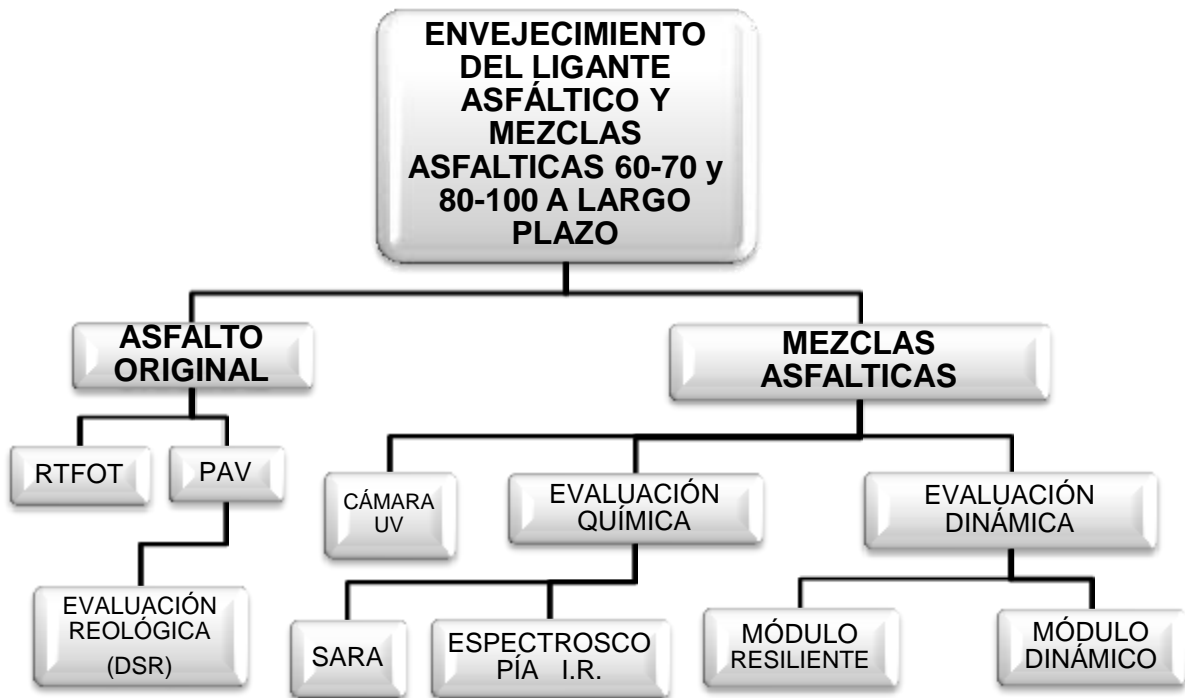


Figura 23 - Diagrama Metodológico (Fuente: Presentación propia de los Autores)

4.1 ASFALTO ORIGINAL

Cuando hablamos de asfalto, debemos saber que éstos poseen características estructurales que se componen de partículas fluidas y sólidas pero que no son visiblemente notorias. El asfalto es un ligante que se encuentra de distintas formas en la naturaleza, con hallazgos en estado puro o con una matriz de agregados pétreos gruesos o finos pero que generalmente se obtiene a partir de la refinación del petróleo y que en nuestro país es el de mayor utilización.

4.2 ESPECIFICACIONES DEL ASFALTO ORIGINAL

Siguiendo las especificaciones técnicas del INVIAS (Art. 400-96 y Sección 400.2.2) para el cemento asfáltico, se determina que el empleo de las mezclas asfálticas de penetración 60-70 u 80-100 van de acuerdo a las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía. De igual manera se describen los requisitos de calidad del cemento asfáltico establecidos por la norma para cada tipo de asfalto.

Tabla 8 - Especificaciones del cemento asfaltico (fuente: Invias).

Característica	Unidad	Norma de ensayo INVIAS	Grado de penetración			
			60 - 70		80 - 100	
			Mín	Máx	Mín	Máx
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706-07	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724-07	-1	+1	-1	+1
Ductilidad (25°C, 5 cm/min)	cm	E-702-07	100	-	100	-
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	E-709-07	230	-	230	-
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos)	%	E-720-07	-	1.0	-	1.0
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original	%	E-706-07	52	-	48	-
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720)	°C	E-712-07	-	5	-	5

El asfalto original proveniente de Barrancabermeja, ha sido suministrado por la Pontificia Universidad Javeriana para efectos experimentales en el laboratorio de pavimentos. Con el propósito de desarrollar la simulación de envejecimiento de largo plazo (PAV: Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés), se requiere primero adelantar el ensayo de película delgada rotatoria (RTFO: Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en inglés) tal como lo recomienda la norma Invias (E-751-07 – Item: 1.1). Para tal efecto, se procede a tomar el asfalto original y dar

comienzo al ensayo de envejecimiento de corto plazo por medio del horno giratorio de acuerdo al procedimiento indicado en la norma INV- E- 720. Este ensayo, consiste en introducir en ocho (8) recipientes de vidrio, 35 gramos de asfalto original (60-70 u 80-100) por recipiente, donde las muestras son puestas horizontalmente en un horno con flujo de aire caliente y velocidad rotatoria constante por un tiempo de 85 minutos y una temperatura de 163°C.

Una vez termina el ensayo, es necesario retirar los recipientes de vidrio del horno con el fin de recuperar el asfalto que fue objeto de envejecimiento a corto plazo. La recuperación del residuo de asfalto proveniente de película delgada es de aproximadamente el 35% del total de asfalto introducido inicialmente en los recipientes. Por esta razón, es indispensable repetir el ensayo hasta lograr la cantidad de residuo RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test, por sus siglas en ingles) necesario para llenar 10 bandejas de 50 gramos (cada una) que se requieren para un ensayo PAV (Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés).

Para continuar con el envejecimiento de los asfaltos y contando con el producto obtenido del ensayo del horno giratorio, se inicia el ensayo de envejecimiento a largo plazo por medio de la cámara de envejecimiento a presión (PAV: Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés) y de acuerdo a lo establecido en la norma INV E – 751-07, el cual simula un envejecimiento artificial y acelerado de los ligantes.

Este equipo consta de 10 bandejas, las cuales se llenan del residuo de asfalto envejecido a corto plazo y se introducen en el equipo, sometiendo las muestras a un tiempo de 20 y 50 horas, con una presión de 2.10 MPa y una temperatura entre 90 a 110 °C. *Estas condiciones se registran en la tabla No 8.*

Tabla 9 - Condiciones de tiempo para envejecimiento acelerado (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Muestras	Tiempos (Horas)		Temperatura	Presión
60-70	20	50	90 – 110°C	2.10 MPa
80-100	20	50		

Cuando el ensayo culmina, es necesario desgasificar las muestras del ligante asfáltico ya que éste equipo, como su nombre lo indica, trabaja bajo un sistema de presión de 2.10 MPa, establecido por norma.

Dentro de las disposiciones de la norma INV E – 751-07, se establece que el residuo proveniente del ensayo de la cámara de envejecimiento a presión (PAV), es usado para evaluar las propiedades físicas y/o químicas de los ligantes asfálticos, para un tiempo estimado de cinco a diez años de envejecimiento representados en campo. Estas estimaciones de envejecimiento a largo plazo están contempladas para un tiempo de envejecimiento acelerado en PAV (Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés) de 20 horas (según norma) y con los demás parámetros descritos en la tabla No 8.

4.2.1. ESPECIFICACIONES REOLÓGICAS

Debido a que el fenómeno de envejecimiento de los asfaltos, altera las propiedades fisicoquímicas del material (Vargas & Reyes /2010), se puede interpretar que las propiedades de los asfaltos cambian con el tiempo. Cuando se procesan los ensayos de envejecimiento de los ligantes asfálticos, éstos se someten a condiciones de temperatura y presión que influyen directamente en el comportamiento fisicoquímico e involucran otros cambios a nivel estructural.

Esto hace parte de las características reológicas de los asfaltos que se refiere a la variación de las propiedades del flujo a través del tiempo (Reyes /2003).

Con los residuos obtenidos de los ensayos de envejecimiento de corto y largo plazo y teniendo en cuenta los cambios que han sufrido con respecto a los asfaltos originales, se determinan las propiedades reológicas de cada uno de los ligantes asfálticos envejecidos.

El ensayo que mide las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos, se procesa con el Reómetro de Corte Dinámico (DSR), que está normativizado por el INVIAS (I.N.V. E – 750 – 07). Este ensayo busca establecer las propiedades lineales viscoelásticas de los ligantes asfálticos con la determinación del módulo de corte dinámico (G^*) y el ángulo de fase (δ).

La metodología utilizada para el ensayo de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos, está dirigida por la norma que establece los requisitos de calidad de los cementos asfálticos grado PG (N-CMT-4-05-004/08). Esta norma permite utilizar ciertos requerimientos de calidad necesarios para la elaboración de mezclas asfálticas o fabricación de emulsiones asfálticas.

Cuando hablamos de cementos asfálticos grado PG, se debe partir de la base que los pavimentos experimentan alteraciones estructurales gracias a los cambios bruscos de temperatura a los que normalmente son sometidos, especialmente en procesos experimentales de laboratorio. Esos cambios de temperaturas (máximas y mínimas), definen el comportamiento del pavimento, dependiendo de su desempeño y resistencia a las deformaciones y/o agrietamientos producidos por los cambios de temperatura o por los ciclos de carga. Es precisamente aquí, donde se deben correlacionar los ensayos especiales de laboratorio como son las simulaciones de envejecimiento de corto y largo plazo.

Sabiendo que las temperaturas son uno de los parámetros más importante para el ensayo reológico de los ligantes asfálticos, en la metodología PG se denomina como el grado de desempeño, el cual contempla un rango de temperaturas (máximas y mínimas) que se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis grados.

El grado de desempeño permite establecer el cemento asfáltico más adecuado en una vía, teniendo en cuenta otros parámetros como el clima y tránsito durante su tiempo de servicio.

Para fines de ésta investigación, se clasifica un cemento asfáltico con PG 64 -22 que tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como 64 grados Celcius y tan bajas como -22 grados Celcius. (*Recomendaciones de la norma(N-CMT-4-05-004/08-grado PG)*).

En la siguiente tabla, se indican los requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG contemplados para los distintos estados de los asfaltos (originales o envejecidos).

Tabla 10 - Requisitos de calidad para cementos asfálticos grado PG (N-Cmt-4-05-004/08).

Grado de comportamiento	PG 64				PG 70				PG 76			PG 82			PG 88		
	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-40	-22	-28	-34	-22	-28	-34	-22	-28	-34
Temperatura máxima de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	64				70				76			82			88		
Temperatura mínima de diseño del pavimento, °C	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-40	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34	>-22	>-28	>-34
Asfalto original																	
Punto de inflamación Cleveland ¹¹ , °C, mín.	230																
Viscosidad dinámica a 135°C ¹² ; Pa·s (P ¹²), máximo	3																
Módulo reológico de corte dinámico (G' sen δ) ^{11,12} , kPa, mínimo	1																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de prueba de película delgada y aire de horno ¹¹																	
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1																
Módulo reológico de corte dinámico (G' sen δ) ¹² , kPa, mínimo	2,2																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	64				70				76			82			88		
Después de envejecimiento en vacía de presión temperatura y aire																	
Temperatura de envejecimiento PAV; °C																	
• En climas normales	100				100				100			100			100		
• En climas desérticos	100				110				110			110			110		
Índice de endurecimiento físico ¹⁶ , máximo	Reportar																
Rigidización (G' sen δ) ¹¹ ; kPa, máxima	5 000																
• Temperatura de prueba @ 10 rad/s; °C	25	22	19	16	28	25	22	19	31	28	25	34	31	28	34	31	28
Rigidez de Flexión S _v ¹⁷ , MPa, máximo (w=0,3 min)	300																
• Temperatura de prueba @ 60 s; °C	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-30	-12	-18	-24	-12	-18	-24	-12	-18	-24

Con la determinación del grado de desempeño PG, los requisitos que se recomiendan para las temperaturas dadas (señalizadas en rojo en la Tabla 10) y un factor fatiga correspondiente a 5000 kPa, se desarrolla el ensayo de

mediciones de las propiedades reológicas de los ligantes asfálticos teniendo en cuenta éstos parámetros.

Una vez se define la metodología, se inicia el ensayo de acuerdo a las especificaciones de la norma del INVIAS (I.N.V. E – 750 – 07), la cual señala el procedimiento que se usa para medir el módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ). Como parte de la operación del reómetro, consiste en calcular éstos dos parámetros importantísimos para determinar los niveles de desempeño del ligante.

Según la norma INVIAS (I.N.V. E – 750 – 07), el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ) definen la resistencia a la deformación de corte de un ligante asfáltico en la región lineal viscoelástica y otras propiedades lineales viscoelásticas, tales como el módulo de almacenamiento (G') o el módulo de energía disipada durante cada ciclo de carga (G'') se pueden calcular a partir del módulo complejo (G^*) y el ángulo de fase (δ).

4.2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ENSAYO.

El reómetro de corte dinámico es un equipo que está compuesto por una base metálica circular (estática) y otra base metálica circular que puede ser movida verticalmente por medio del software del equipo. Estas bases o “platos metálicos” tienen unos diámetros definidos (8 mm y 25 mm) y deben ser paralelos y geoméricamente iguales, es decir que tanto los diámetros del plato superior como del inferior deben centrar uno con respecto al otro.

En la figura 24, se muestran las dimensiones de la placa que se deben respetar según lo contempla la norma INVIAS (I.N.V. E – 750 – 07 – Fig. 1)

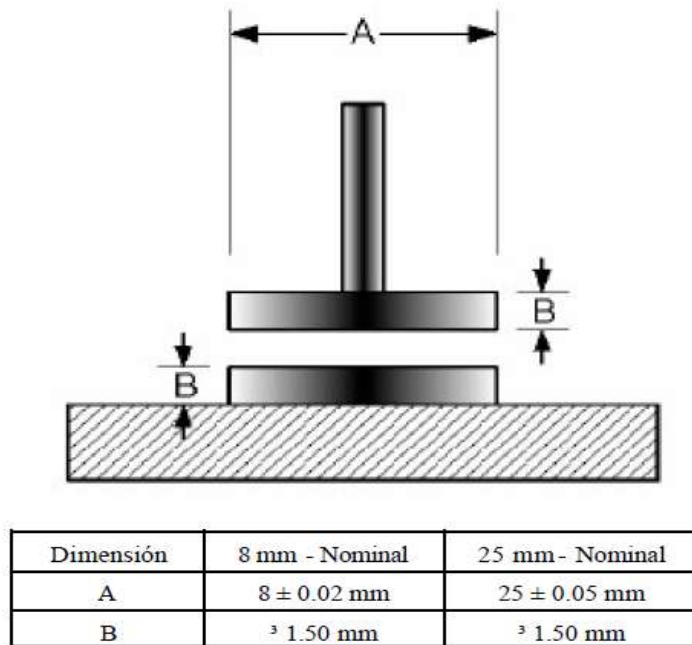


Figura 24 - Dimensiones de los platos metálicos (fuente: I.N.V. E – 750 – 07 – 1)

Igualmente se debe tener en cuenta, el controlador de temperatura que mantienen la temperatura de las probetas dentro de 0.1°C , para temperaturas de ensayo entre 3° a 88°C , pero que para fines de la presente investigación se han estimado las temperaturas, de acuerdo al grado de desempeño PG (Tabla 9).

En cuanto al dispositivo de carga, se aplicará una carga oscilatoria sinusoidal a la probeta, a una frecuencia de $10^{\pm} 1$ rad/s y si se usan frecuencias diferentes a 10 rad/s, la precisión debe ser de 1 %.(Norma I.N.V. E – 750 – 07).

El ensayo está destinado para ligantes asfálticos hasta dimensiones de $250\ \mu\text{m}$ y valores de corte dinámico de 100 Pa a 10 MPa.

4.3 MEZCLAS ASFÁLTICAS

A partir de la metodología SUPERPAVE, se desarrolló un diseño volumétrico de mezcla teniendo en cuenta la selección de los agregados y del ligante asfáltico. Se definió diseñar una mezcla asfáltica convencional tipo MDC-2 según la clasificación del INVIAS, para la cual fue necesario seleccionar el contenido del ligante asfáltico y granulometría.

Para seleccionar la estructura de diseño, calculando la granulometría de la mezcla por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales. La granulometría de la mezcla fue luego comparada con los requerimientos de la especificación para los tamices correspondientes. El tamiz máximo nominal, corresponde a un tamaño mayor que el primer tamiz que retiene más del 10% del agregado combinado. La zona restringida es un área cuyos límites están a ambos lados de la línea de máxima densidad. Para una mezcla con tamaño nominal de 12.5 mm, ésta inicia en el tamiz de 2.36 mm (No 8) y se extiende hasta el tamiz de 300 mm (No 50).

Al variar el tamaño máximo nominal de la mezcla, los valores mínimos y máximos requeridos para los tamices de control, así como también la zona restringida cambian.

La tabla 11, describe los requerimientos granulométricos para la estructura del agregado de diseño.

Tabla 11 - Criterio granulométrico para una mezcla nominal de 12.5 mm (Fuente: Shrp: Strategic Highway Research Program, por sus siglas en inglés, 1994)

Item de control	Tamaño del tamiz, mm	Mínimo, %	Máximo, %
	19.0	100	100
Puntos de control	12.5	90	100
	2.36	28	58
	0.075	2	10
	2.36	39.1	39.1
Zona restringida	1.18	25.6	31.6
	0.60	19.1	23.1
	0.30	15.5	15.5

Cualquier granulometría propuesta para la mezcla, debe pasar entre los puntos de control establecidos sobre los cuatro tamices y por fuera del área restringida. Esta granulometría cumplió con el criterio del INVIAS para una mezcla asfáltica tipo MDC-2, que se describe en la tabla No 12.

Tabla 12 - Granulometría de Diseño para la Mezcla Asfáltica MDC-2 (Fuente: INVIAS, 2007)

Tamiz mm	Apertura ^0.45	Zona restringida	Puntos de control	Especific. MDC-2	% Pasante acumulado	% Retenido acumulado	Porcentaje retenido	Peso retenido g
19.0	3.762		100	100	100.0	0.0	0.0	0.00
12.5	3.116		90 - 100	80 - 95	93.0	7.0	7.0	139.09
9.5	2.754			70 - 88	79.0	21.0	14.0	278.19
4.75	2.016			49 - 65	57.0	43.0	22.0	437.15
2.36	1.472	39.1 - 39.1	28 - 58					
2.00	1.366			29 - 45	40.0	60.0	17.0	337.80
1.18	1.077	25.6 - 31.6						
0.60	0.795	19.1 - 23.1						
0.425	0.680			14 - 25	22.0	78.0	18.0	357.67
0.30	0.582	15.5 - 15.5						
0.180	0.462			8 - 17	12.5	87.5	9.5	188.77
0.075	0.312		2 - 10	4 - 8	6.0	94.0	6.5	129.16
Fondo					0.0	100.0	6.0	119.22
						Σ	100.0	1987.05

Las proporciones de la mezcla apuntan a lograr una gradación cerrada, cerca de la línea de máxima densidad y distante de los tamices de control o de la zona restringida; de igual manera tienden a ser el valor medio de los intervalos INVIAS cumpliendo el requisito anterior. La granulometría final de diseño se muestra (señalizada en negrilla) en la tabla 12.

En la figura 25, se muestran los requerimientos granulométricos para una muestra nominal de 12.5 mm.

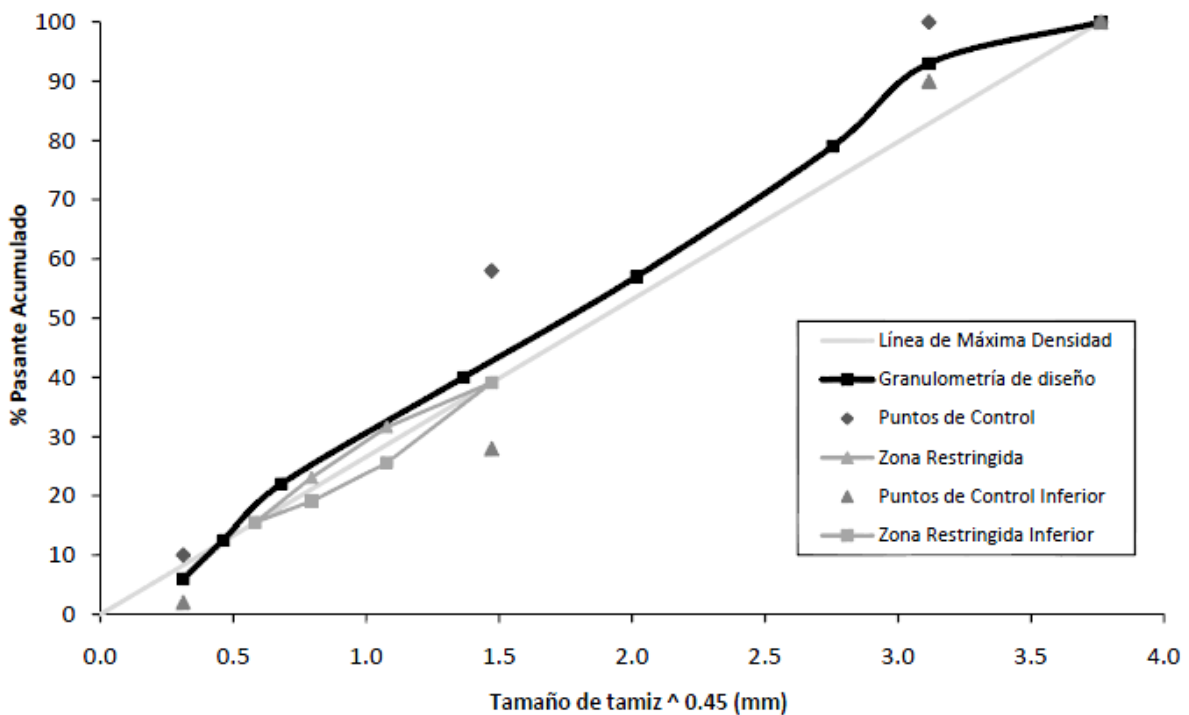


Figura 25 - Granulometría de la mezcla asfáltica MDC – 2 (Fuente: INVIAS, 2007)

Para el diseño se seleccionó una mezcla que pasó por encima de la zona restringida ya que SUPERPAVE no exige que las mezclas pasen por encima o debajo de dicha zona.

Con la selección de la mezcla de diseño, fue necesaria la determinación de las propiedades de los agregados exigidas por SUPERPAVE. La tabla 12, muestra el resumen de los valores obtenidos de los ensayos de caracterización.

Tabla 12 - Propiedades de la mezcla de agregados pétreos (Presentación propia de los autores)

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

Con base en los resultados anteriores, se consideró la muestra aceptable y se determinó como la estructura de agregado de diseño.

Luego se hizo la evaluación de la mezcla de diseño mediante la compactación de especímenes y la determinación de sus propiedades volumétricas. Al compactar, se determinó el contenido del ligante asfáltico para la mezcla, estimando el peso específico de la mezcla con algunos cálculos matemáticos, en función de la gravedad específica y el volumen de vacíos de aire.

$$V_{ba} = \frac{P_s(1 - V_a)}{(P_b/G_b + P_s/G_{se})} (1/G_{sb} - 1/G_{se})$$

$$V_{ba} = \frac{0.95(1 - 0.04)}{(0.05/1.007 + 0.95/2.625)} (1/2.583 - 1/2.625) = 0.0290 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Finalmente los especímenes se mezclaron a una temperatura apropiada entre 148 y 152 °C para el ligante asfáltico y se sometieron luego a un envejecimiento de corto plazo para luego colocar la mezcla suelta en un recipiente plano e ingresarlo a un horno a 135°C por un tiempo de tres horas.

Luego se compactó la mezcla en el compactador giratorio, en donde el número de giros para la compactación se determinó en función de la temperatura promedio del aire para diseño (15°C aprox. Para Bogotá) y el nivel de tránsito (penúltimo intervalo), como se establece en la Tabla 14.

Tabla 13 - Número de giros del compactador giratorio SUPERPAVE. (Fuente: SHRP: Strategic Highway Research Program, por sus siglas en inglés, 1994)

ESALs de diseño (en millones)	Promedio de la máx. temperatura del aire para el proyecto											
	< 39 °C			39 °C – 40 °C			41 °C – 42 °C			43 °C – 44 °C		
	Nini	Ndis	Nmáx	Nini	Ndis	Nmáx	Nini	Ndis	Nmáx	Nini	Ndis	Nmáx
< 0.3	7	68	104	7	74	114	7	78	121	7	82	127
0.3 - 1	7	76	117	7	83	129	7	88	138	8	93	146
1 - 3	7	86	134	8	95	150	8	100	158	8	105	167
3 - 10	8	96	152	8	106	169	8	113	181	9	119	192
10 - 30	8	109	174	9	121	195	9	128	208	9	135	220
30 - 100	9	126	204	9	139	228	9	146	240	10	153	253
> 100	9	142	233	10	158	262	10	165	275	10	172	288

4.4. GRANULOMETRÍA

Como primer insumo para la elaboración de las mezclas asfálticas, fue necesario contar con el material de granular el cual fue ubicado en el río Coello (Tolima) y básicamente corresponde a material granulometría de las arenas.

Teniendo en cuenta el objetivo general de la presente investigación que consiste en la elaboración de mezclas asfálticas, se procede a clasificar el material granular necesario para fabricar las briquetas de módulo dinámico y módulo resiliente.

En la tabla 15, se relaciona la clasificación granulométrica de las mezclas asfálticas de módulo dinámico.

Tabla 14 - Granulometría para briquetas de ensayo de módulo dinámico (10x20 cm) (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Tamiz	% Pasa Acum.	% Retenido Acum.	% Retenido	Peso Retenido (g)
¾	100	0	0	0
½	93	7	7	224,43
3/8	79	21	14	448,87
4	57	43	22	705,37
10	40	60	17	545,05
40	22	78	18	577,11
80	12,5	87,5	9,5	304,59
200	6	94	6,5	208,4
Fondo	0	100	6	192,38
Total			100	3206,2
Peso del Asfalto: 193,8 g				
Peso de la mezcla: 3400 g				

Esta granulometría, fue utilizada para la fabricación de mezclas asfálticas MDC-2 60-70 y 80-100, tal como se muestran en la figura 26.



Figura 26 - Briquetas para ensayo de módulo dinámico (10cm x20 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores)

De igual forma, se hizo la clasificación granulométrica para las briquetas del módulo resiliente (dimensiones: 10cm x 7 cm) y cuyas mezclas contemplan las mismas especificaciones del módulo dinámico (Ver Tabla 16).

Tabla 15 - Granulometría para briquetas de ensayo de módulo resiliente (10cm x7 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Tamiz	% Pasa Acum.	% Retenido Acum.	% Retenido	Peso Retenido (g)
¾	100	0	0	0
½	93	7	7	78,55
3/8	79	21	14	157,11
4	57	43	22	246,88
10	40	60	17	190,77
40	22	78	18	201,99
80	12,5	87,5	9,5	106,6
200	6	94	6,5	72,94
Total			100	1122,17
Peso del Asfalto: 67,83 g				
Peso de la mezcla: 1190 g				

Debido a que estas mezclas son geométricamente más pequeñas, requieren de menos material granulométrico y por ende se reduce su tamaño final; tal como se evidencia en la figura 27.



Figura 27 -Briquetas para ensayo de módulo resiliente (10cm x7 cm). (Fuente: Presentación propia de los Autores).

4.5 CÁMARA ULTRAVIOLETA

Una vez fabricadas las mezclas asfálticas MDC- 2 con asfaltos colombianos 60-70 y 80-100 con seis tiempos de envejecimiento que oscilan entre 20 y 1000 horas para módulos dinámicos y 1000 horas para los módulos resilientes con dos relaciones de vacíos correspondientes a 4% y 10%; se procede a ingresar las briquetas a la cámara UV.

Antes que nada, se debe proteger la superficie vertical (diametral) de todas las briquetas, con un material que impida su radiación ultravioleta ya que puede afectar su resistencia estructural con los tiempos de exposición.

Se utiliza un material protector a base de policarbonato flexible que permita la manipulación y ajuste diametral. También se debe hacer las respectivas marcas en cada una de las briquetas, de manera que indiquen a que tiempos de exposición corresponde cada una. (Ver figura 28).



Figura 28 - Briquetas en la cámara ultravioleta. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Debe existir un cronograma de ingresos y retiros de las briquetas en la cámara UV, ya que ésta tiene un espacio limitado de 21 briquetas. Con base en esto, se podrá estimar los tiempos de exposición sin error a equivocaciones.

El proceso de fabricación de las briquetas, correspondió primeramente a las del módulo dinámico ya que además de tener más trabajo de fabricación, superan en cantidad a las del módulo resiliente. En la tabla 17, se muestra la relación de briquetas correspondiente al módulo dinámico.

Tabla 16 - Relación de número de briquetas para ensayo de módulo dinámico (10cmx20 cm).
(Fuente: Presentación propia de los Autores)

Tiempo (Horas)	Briquetas de 10 x 20 cm			
	60/70		80/100	
	4%	10%	4%	10%
20	3	3	3	3
50	3	3	3	3
100	3	3	3	3
200	3	3	3	3
500	3	3	3	3
1000	3	3	3	3
Total por %	18	18	18	18
Total por asfalto	36		36	
Total de briquetas	72			

Así mismo, se relaciona en la tabla 18 las briquetas correspondientes al módulo resiliente, donde cada una de ellas tiene dimensiones establecidas.

Tabla 17 - Relación de número de briquetas para ensayo de módulo resiliente (10cmx7 cm).
(Fuente: Presentación propia de los Autores)

Tiempo (Horas)	Briquetas de 10 cm x 7 cm			
	60/70		80/100	
	4%	10%	4%	10%
0	3	3	3	3
1000	3	3	3	3
Total por %	6	6	6	6
Total por asfalto	12		12	
Total de briquetas	24			

El proceso de envejecimiento por cámara Ultravioleta es una simulación del endurecimiento por envejecimiento de ligantes y de mezclas asfálticas (Vallerga et al.(1957), el cual ha sido tema de investigación por muchos años. La mayoría de las investigaciones que relacionan éste fenómeno con el área de los pavimentos, giran en torno a cómo modelar o simular las condiciones ambientales y condiciones de carga a las que se ve afectado un pavimento durante su vida útil (Martínez & Caicedo , 2005).

Para envejecer las mezclas asfálticas descritas, se utilizó la cámara ATL UVA 340, el cual es un equipo de laboratorio capaz de alternar un periodo de luz fluorescente ultravioleta y un periodo de condensación para exposición de materiales granulares y asfálticos. Un ciclo corresponde a dos periodos, donde el periodo de radicación es por un tiempo de 2 horas y el periodo de condensación es por 10 minutos, es decir un ciclo comprendía 2 horas y 10 minutos.

4.6 MÓDULO DINÁMICO.

Una vez se cuenta con la totalidad de las briquetas de la tabla 17, se procede a realizar el ensayo de módulo dinámico para las 72 briquetas de 10 cm x 20 cm de acuerdo al procedimiento establecido en la norma INV E -754.

El ensayo se desarrolla a través del equipo hidráulico MTS que cuenta con un generador que produce una onda de medio seno inverso para calcular el módulo dinámico. Este trabaja con temperaturas de 5, 25 y 40°C con frecuencias de 1.0, 4.0 y 16 Hz.

Se debe ingresar continuamente un número de briquetas (según espacio del equipo) a la cámara UV, para que alcancen las temperaturas especificadas del ensayo (Ver figura 29a). El esfuerzo, corresponde a 35 psi durante 40 segundos y allí se miden las deformaciones resultantes para cada una de las frecuencias establecidas. (Ver figuras 29b y 29c).



Figura 29a -Briquetas en horno para ensayo de Módulo Dinámico. (Fuente: Presentación propia de los Autores)



Figura 29b - Instalación de deformímetros. (Fuente: Presentación propia de los Autores)



Figura 29c - Ubicación de carga vertical para asignación de carga vertical. Fuente: Presentación propia de los Autores)

Debido a que las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga; significa que a bajas temperaturas el comportamiento es elástico lineal, pero al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, mostrando un comportamiento viscoso a medida que la temperatura sigue aumentando.

Se debe medir la amplitud promedio de carga y la deformación durante los cuatro últimos ciclos para calcular el módulo dinámico.

4.7 MÓDULO RESILIENTE

Al igual que en el ensayo de módulo dinámico, se deben tener preparadas las briquetas previamente expuestas en la cámara UV. El método de ensayo utilizado para determinar el módulo resiliente, es el de tensión indirecta, el cual es un método no destructivo cuyo tiempo de ejecución es corto.

El método consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo del diámetro vertical de una probeta cilíndrica, el cual induce un esfuerzo indirecto de tensión a lo largo del diámetro horizontal y una deformación a lo largo del mismo diámetro. La norma que se sigue para ésta prueba, corresponde a INV E – 749 – 07 y está estipulada para briquetas de 100 mm de diámetro y 700 mm de altura.

Como herramienta de trabajo, se utilizó el equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester, por sus siglas en inglés) compuesto por una prensa hidráulica que aplica un pulso de carga de compresión a lo largo del diámetro vertical de la biqueta con temperaturas de 10, 25 y 35 °C y frecuencias de carga de 1.6, 4.0 y 10 Hz. La función del ensayo es aplicar tensiones e ir registrando deformaciones horizontales. (Ver figura 30).



Figura 30 - Equipo NAT para ensayo de módulo resiliente (Imagen tomada del laboratorio de pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana)

Las briquetas se acondicionan previamente a la temperatura del ensayo antes de ser centradas en la cámara; luego se mide para cada briqueta la máxima deformación horizontal en el centro de la briqueta a partir de la relación de Poisson. De igual manera se mide en el centro, el máximo esfuerzo por tensión y el módulo de rigidez.

Los valores del módulo resiliente se pueden emplear para evaluar la calidad relativa de los materiales, así como para generar datos de entrada para el diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. El ensayo se puede emplear para estudiar efectos de temperatura, rata de carga, períodos de reposo, etc.

4.8 ESPECTROSCOPIA

Para el desarrollo de éste ensayo, es necesario extraer las partículas de filler de la cara expuesta en la cámara UV, que se supone tubo un envejecimiento por radiación y condensación. Este procedimiento se ejecutó para las briquetas de exposición a 1000 horas en cámara UV, en donde se necesitó extraer dos gramos de este material para hacer la prueba de espectroscopía infrarroja.

El equipo utilizado se denomina Espectrofotómetro Infrarrojo y está diseñado para obtener el espectro de un compuesto (en este caso del compuesto asfáltico) que indica los diferentes picos en donde se miden los grupos funcionales de dicho compuesto.

Se debe analizar las diferentes bandas de absorción que arroja el espectro, en las zonas de tensión del grupo carbonilo que aparecen ligeramente por debajo de 3000 cm^{-1} , que es donde se presentan los mayores números de onda, representando las vibraciones de tensión asimétrica. Las bandas que generan mayor vibración y por ende mayor absorción se analiza a los 1500 cm^{-1} .

El ensayo de Espectroscopia infrarroja se fundamenta en la absorción de la Radiación Infrarroja por las moléculas en vibración, en las cuales éstas absorben la energía de un haz de luz infrarroja cuando dicha energía incidente sea igual a la necesaria para que se dé una transición vibracional de la molécula.

En principio, cada molécula presenta un espectro IR característico, debido a que todas las moléculas tienen algunas vibraciones que al activarse, provocan la absorción de una determinada longitud de onda en la zona del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo.

En la zona del espectro electromagnético IR con longitudes de onda del infrarrojo medio (1530 y 1700 cm^{-1}), en esta zona de longitudes de onda, pequeñas

diferencias en la estructura y constitución de las moléculas dan lugar a variaciones importantes en los máximos de absorción.

4.9 MÉTODO S.A.R.A.

El ensayo del S.A.R.A (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos), está destinado para analizar el fraccionamiento de los grupos funcionales de los asfaltos comprendidos en cuatro secciones. La cromatografía de la columna SARA está descrita en la norma ASTM D 2007 – 93.

Como desarrollo del ensayo, fue necesario hacer la extracción de asfalto envejecido de las briquetas de 1000 horas en cámara UV.

Debido a que el ensayo es muy exigente en cuanto a la “pureza” del ligante asfáltico, se debe realizar la extracción por rotovapor y centrífuga; para lo cual es indispensable el uso de solventes que nos permitan garantizar un ligante asfáltico libre de impurezas generadas por el agregado en la preparación inicial de la mezcla asfáltica.

Una vez se obtiene éste residuo, se procede al desarrollo del ensayo a través de la cromatografía de la columna SARA que es la que entrega los resultados de éste fraccionamiento que nos define si el asfalto es de tipo Gel (sólido) o de tipo sol (fluido); es decir, que dentro de éstas separaciones del grupo funcional, hay componentes que transforman químicamente al ligante en rígido o fluído.

Gracias a éste ensayo, podemos determinar qué tipo de asfalto logramos a periodos de envejecimiento de largo plazo, como los que planteamos en ésta investigación.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Tabla 18 - Relación de los materiales y métodos utilizados en la presente investigación (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Ensayo	Método	Materiales
Envejecimiento a corto plazo	Norma INV – 720-07	Horno Rotatorio de Película Delgada RTFOT
		8 recipientes de vidrio
		Asfalto original 60-70 y 80-100 de Barrancabermeja (Santander)
Envejecimiento a largo plazo	Norma INV – E 751-07	Equipo PAV
		10 bandejas metálicas
Reómetro de Corte Dinámico	Norma INV – 750 - 07	Asfalto envejecido a corto plazo 60-70 y 80-100
		Equipo Reómetro de Corte Dinámico
Módulo Dinámico	Norma INV - E - 754	Asfalto envejecido a largo plazo 60-70 y 80-100
		12 Briquetas de 10 cm x 20 cm con asfalto 60-70 y 80-100 y porcentajes de vacíos 4% y 10%, envejecidas en cámara ultravioleta a 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 horas.
		Compactador Giratorio
		Equipo MTS
Módulo Resiliente	Norma INV - 749	Deformímetros
		Equipo NAT (Nottingham Asphalt Tester)
Espectroscopía	A review of the fundamentals of asphalt oxidation de J.Claine Petersem	6 Briquetas de 10 cm x 7 cm con asfalto 60-70 y 80-100 y porcentajes de vacíos 4% y 10%, envejecidas en cámara ultravioleta a 0 y 1000 horas.
		Extracción de asfalto de las briquetas
		Rotovapor
SARA	ASTM D 2007 – 93	Espectrofotómetro Infrarrojo
		Extracción de asfalto de las briquetas
		Rotovapor - Centrífuga
		Cromatografía columna SARA

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 EVALUACIÓN REOLÓGICA

La evaluación reológica parte del asfalto original 60 - 70 y 80 - 100 donde se procedió a realizar el ensayo de envejecimiento a corto plazo por medio de RTFOT, residuo de este ensayo se realizó el envejecimiento a largo plazo en el equipo de PAV de acuerdo con la metodología previamente descrita en el capítulo anterior.

Obteniendo el asfalto 60 -70 y 80 -100 envejecido por medio del PAV a 20 y a 50 horas, se desarrolló la evaluación reológica por medio del reómetro de corte directo, donde nos determina los valores de módulo complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) obteniendo los siguientes resultados:

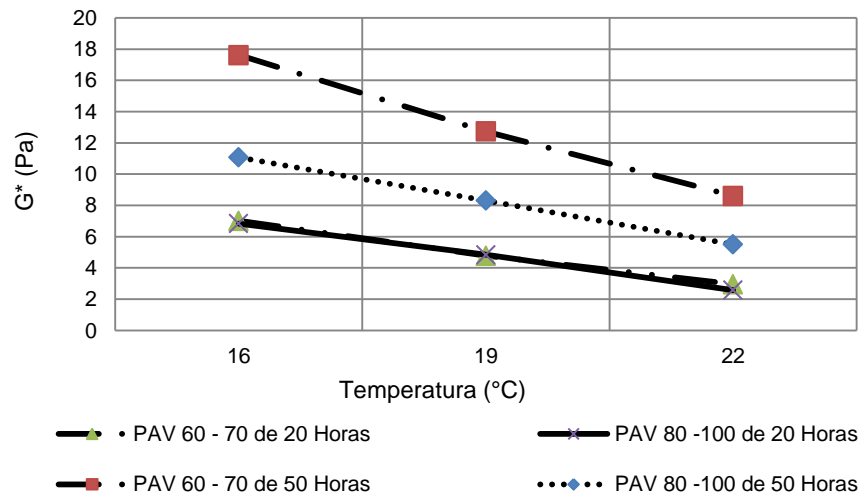


Figura 31 - Comparación del módulo complejo vs temperatura para los asfaltos envejecidos a 20 y 50 horas. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

En la figura 31 se representa los valores del módulo complejo (G^*) para los asfaltos 60-70 y 80-100 envejecidos a corto y largo plazo a 20 y 50 horas con temperaturas de 16°, 19° y 22°C. La norma INV – 750 establece realizar el ensayo con un rango de temperaturas entre 6° y 88°C, sin embargo se utilizó la metodología por grado de desempeño, que para éste caso se clasifica un PG 64, el cual está condicionado a temperaturas de 16°, 19°, 22° y 25° C después de ser envejecidos los asfaltos por medio del equipo del PAV.

El módulo complejo es un indicador de la rigidez a la deformación bajo la carga aplicada, y al incrementar la temperatura el asfalto presenta una mayor oxidación afectando la consistencia del material con la entrada de aire. Por lo anterior, se observa en la figura 32 una mayor rigidez en los asfaltos envejecidos a 50 horas, 60 - 70 que 80 – 100; de ésta manera, decrece el módulo complejo a medida que aumenta la temperatura, debido a las características de penetración que maneja cada asfalto. Esto va ligado, a la presencia de mayor oxidación para un tiempo de envejecimiento de 50 horas.

Los asfaltos 60 - 70 y 80 – 100 envejecidos a 20 horas representan un comportamiento similar en relación al módulo complejo y a la temperatura, donde las propiedades reológicas tienden a ser iguales y a su vez un retraso en la oxidación entre los dos asfaltos para un tiempo de envejecimiento de 20 horas. Es decir, el tiempo de envejecimiento de los asfaltos altera las propiedades reológicas donde se evidencia un endurecimiento por envejecimiento, el cual disminuye a medida que aumenta la temperatura.

En la figura 32 se presentan valores del ángulo de fase (δ) para los asfaltos 60 - 70 y 80 - 100 envejecidos corto y largo plazo a 20 y 50 horas con temperaturas de 16°, 19° y 22° C. Donde el ángulo de fase tiende a ser mayor con menor tiempo de envejecimiento para asfaltos 80 – 100 y 60 – 70 respectivamente: es decir, el ángulo de fase (δ) es inverso al valor del módulo complejo (G^*) generando

presencia de oxígeno y a medida que aumenta la temperatura favorece la oxidación de los asfaltos.

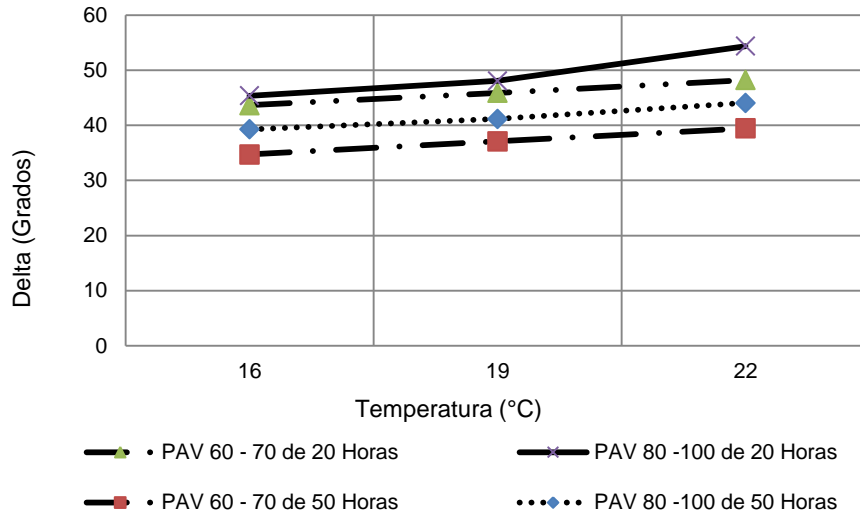


Figura 32 - Comparación de ángulo de fase vs temperatura para asfalto 60-70 y 80-100 envejecidos a 20 y 50 horas. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Los resultados del ensayo de reómetro de corte dinámico – DSR son semejantes a los ensayos realizados por los diferentes autores y referencias consultados durante la presente investigación como Parada, Lepesqueur & Caicedo (2005) y Martinez & Caicedo (2005) de la Universidad de los Andes.

En las figuras 31 y 32 se realizaron la comparación de los asfaltos 60 – 70 y 80 - 100 y de los tiempos 20 y 50 horas, quedando pendiente por establecer la comparación con asfalto original, debido a que los datos existentes en laboratorio corresponden a temperaturas diferentes.

6.2 MÓDULOS DINÁMICOS

Analizando las gráficas por separado de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas con asfaltos 60 - 70 y 80 – 100 y con porcentajes de relación de vacíos de 4% y 10% para los diferentes tiempos de envejecimientos se evidenció que el módulo dinámico incrementa a medida que aumenta la temperatura y la frecuencia de carga, es decir que la variación de los módulos está dado por la temperatura y la frecuencia de carga. El aumento de módulo dinámico es notable para una temperatura de 5° C, decreciendo el modulo con el aumento de temperatura donde a una temperatura de 40° C el valor de módulo dinámico disminuye notablemente.

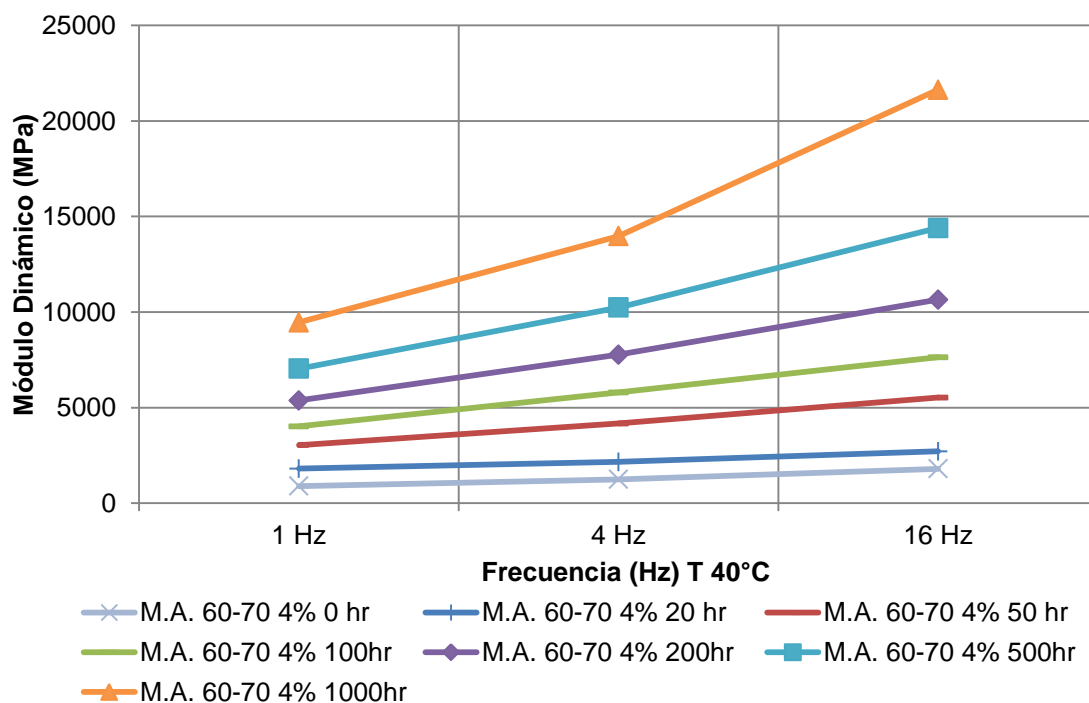


Figura 33 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 60-70 envejecida con 4% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

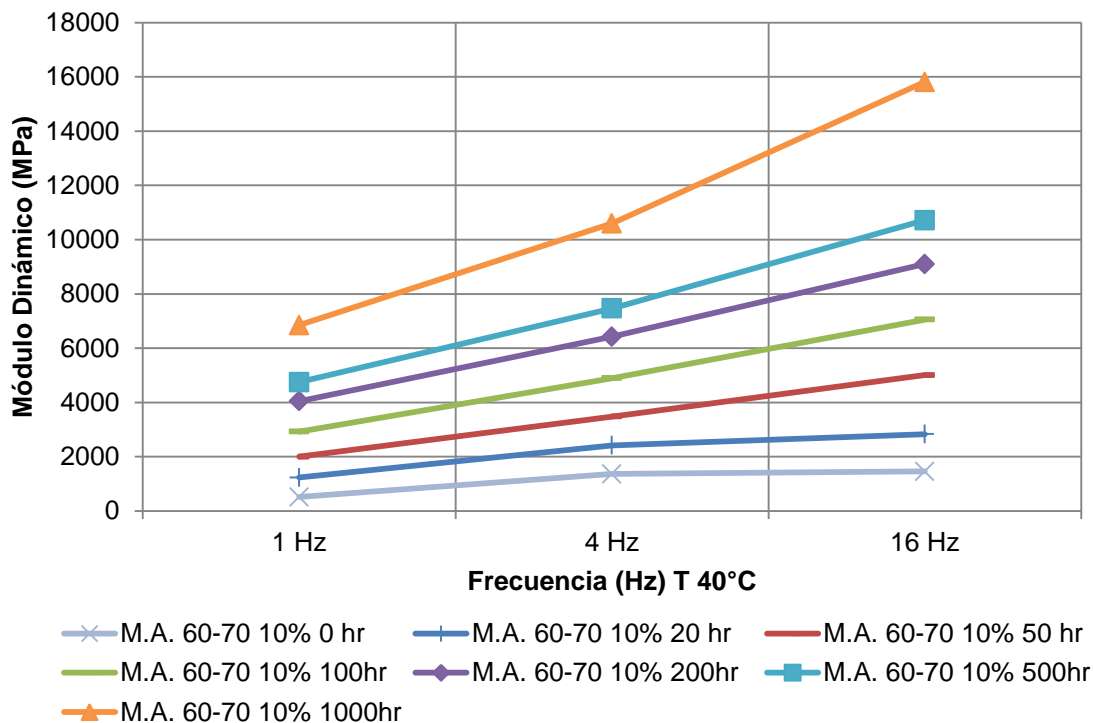


Figura 34 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 60-70 envejecida con 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los autores)

En las figuras 33 y 34 se realiza la comparación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas, con asfalto 60 – 70 con frecuencias de 1,4 y 16 Hz y temperatura de 40°C (siendo ésta la temperatura representativa en el ejercicio de la comparación del módulo dinámico) con un porcentaje de vacíos de 4% y 10% respectivamente después de ser sometidas a envejecimiento por medio de la cámara ultravioleta a 0, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 horas.

Si comparamos el estado del módulo a 1000 horas con respecto al mismo estado pero con cero horas, se evidencia efectivamente un envejecimiento representativo de los tiempos de exposición con cámara UV.

Ahora, si analizamos las tendencias de las curvas, es notable que casi no existe diferencias entre ellas en cuanto a aumento o disminución de los módulos. Sin

embargo, si nos detallamos en las curvas de 1000 horas, existe un pequeño incremento del módulo en la frecuencia de 16 Hz, para el asfalto de 60-70 de 4% de vacíos con respecto al de 10%. Este pequeño incremento que se demuestra en todos los tiempos de las mezclas asfálticas 60-70 – 4%, por encima del 60-70-10% indica que indudablemente representa un mayor envejecimiento la mezcla asfáltica 60-70 de 4% de vacíos ya que sus módulos son superiores.

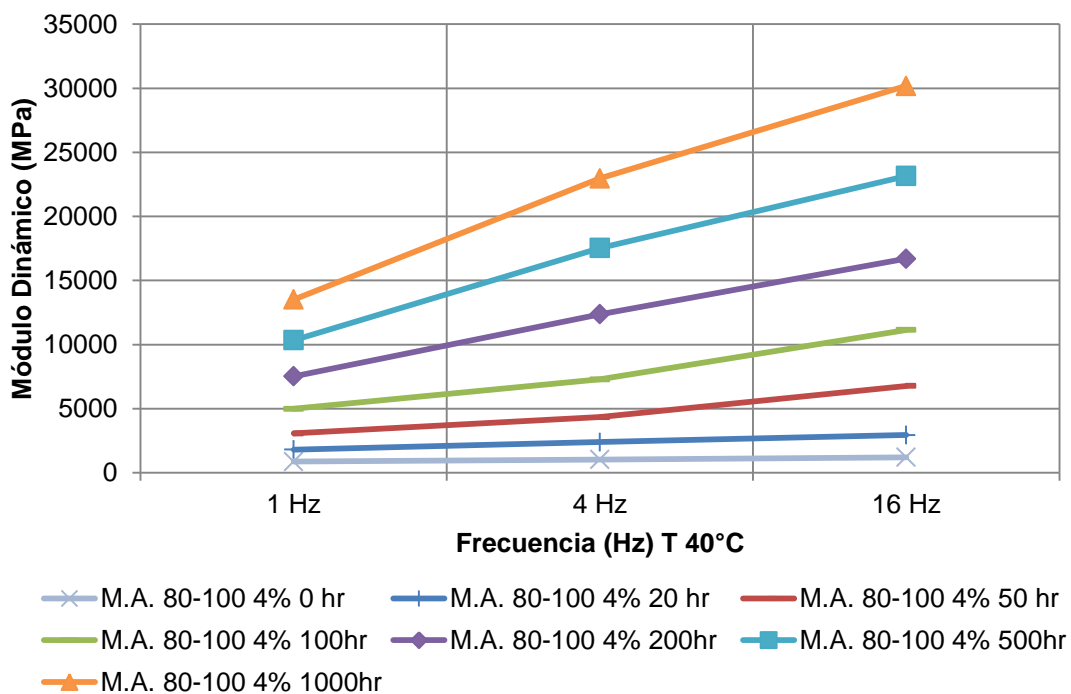


Figura 35 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 80 - 100 envejecidas con 4% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

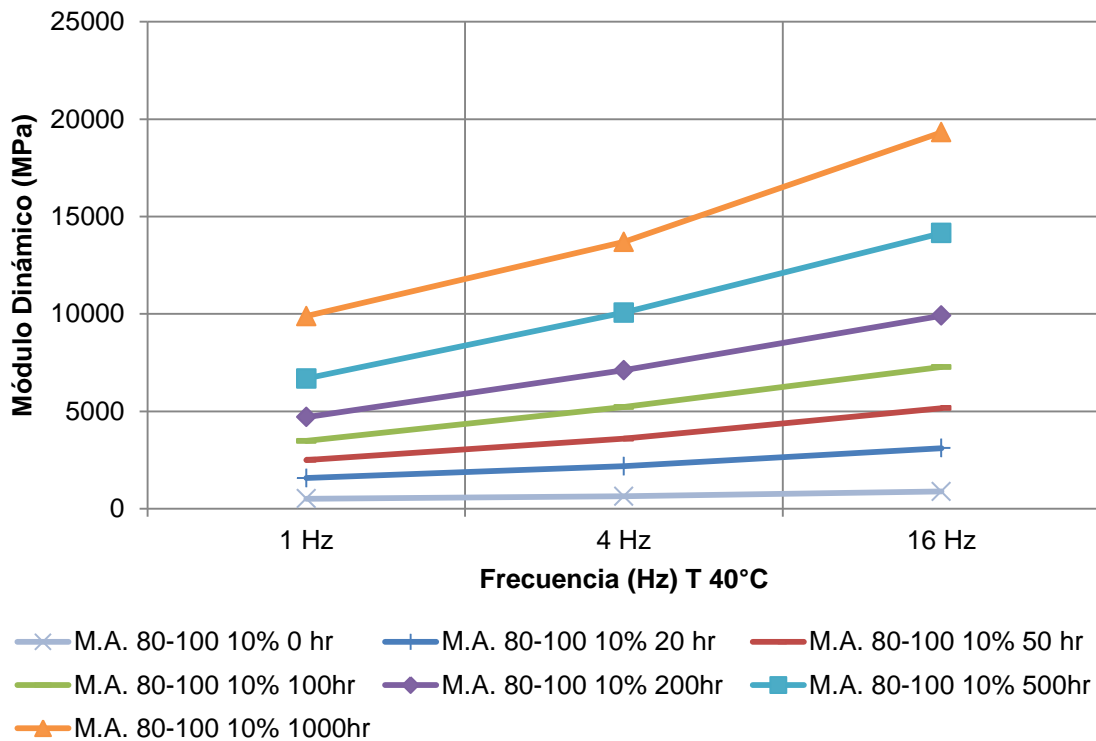


Figura 36 - Comparación de módulo dinámico vs frecuencia de la mezcla asfáltica 80 – 100 envejecidas con 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

En las figuras 35 y 36 se hace la comparación del módulo dinámico de las mezclas asfálticas con asfalto 80 – 100 y con una temperatura de 40° C (siendo 40° C la temperatura representativa en el ejercicio de la comparación del módulo dinámico) con un porcentaje de vacíos de 4% y 10% respectivamente después de ser sometidas a envejecimiento por medio de la cámara ultravioleta a 0, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 horas.

Esta grafica registra un incremento en el módulo dinámico a medida que aumenta la frecuencia de carga, la cual está representada por ondas sinusoidales. Los resultados del módulo dinámico para los diferentes tiempos de envejecimiento se representan de manera consecutiva, es decir inicia con el tiempo de mayor envejecimiento de 1000 horas y concluye con las mezclas asfálticas de 0 horas.

Si hacemos el comparativo entre las mezclas asfálticas 80-100 (4%) y 80-100 (10%), evidenciamos un comportamiento muy similar al encontrado en las comparaciones hechas para el asfalto 60-70. La diferencia es que los valores de módulo dinámico para las curvas de las mezclas asfálticas 80-100 (4%) son más representativos ya que con respecto a las mezclas asfálticas 80-100 (10%) esos incrementos son mucho más evidentes.

Comparando los resultados de los módulos dinámicos de las mezclas asfálticas 60 – 70 y 80 – 100 se evidencia un mayor valor de rigidez para los asfaltos 60 – 70 con un porcentaje de relación de vacíos de 4%, sobre las mezclas asfálticas de 60 – 70 con 10% de relación de vacíos y las mezclas asfálticas 80 – 100 con relación de vacíos de 4% y 10%, lo anterior debido a la capacidad que tiene esta mezcla de recuperarse después de ser sometidas a frecuencias de cargas, así como la relación de vacíos el cual permite menor penetración de oxígeno fortaleciendo la mezcla asfáltica para ser más resistente.

Los resultados deducen que a medida que incrementa la frecuencia mayor es el módulo dinámico, lo que obliga a pensar que una carpeta asfáltica se deforma menos con el aumento de la frecuencia.

Al desarrollar los ensayos de módulo dinámico en el equipo de la MTS, se observaron fracturamientos en algunas briquetas con tiempo de envejecimiento de 1000 horas. Posiblemente, largos tiempos de exposición ultravioleta generan en las mezclas asfálticas debilitamiento estructural y por ende experimentan un proceso de fracturamiento inducido por la carga axial en el momento del ensayo.

6.3 MÓDULOS RESILIENTES

Se cuentan con 24 briquetas de 10 cm x 7 cm, con asfaltos 60 – 70 y 80 – 100 y relación de vacíos de 4% y 10%, de las cuales 12 briquetas fueron sometidas a exposición en la cámara UV por un período de 1000 horas. La diferencia con las 12 briquetas adicionales, corresponde a que éstas no fueron ingresadas en la cámara UV, representando un simple envejecimiento de corto plazo y así poder hacer las respectivas comparaciones de envejecimiento.

Una vez las 12 briquetas fueron envejecidas a 1000 horas, se procedió a realizar el ensayo de módulo resiliente mediante el equipo NAT, donde se obtuvo resultados del módulo a temperaturas de 10°, 25° y 35° C y frecuencias de 1.6 hz, 4 hz y 10 hz provenientes del software del equipo.

Analizando en la figura 37, las tendencias de los módulos resilientes de las mezclas asfálticas con asfaltos 60 - 70 y 80 – 100 y con porcentajes de relación de vacíos de 4% y 10% para tiempos de 0 y 1000 horas, se evidenció que el módulo resiliente incrementa a medida que aumenta la frecuencia de carga, es decir que la variación de los módulos está dado por la frecuencia de carga cada vez que existe un cambio de temperatura.

El módulo resiliente decrece en los cambios de temperatura y aumenta el valor de módulo para cada frecuencia de carga, representando pérdida de las características físicas de las mezclas asfálticas después de recuperar la deformación a la que fue sometida. Los módulos resilientes para temperaturas de 25° y 35° C, tienden a tener valores similares debido a que ya han experimentado una deformación y recuperación inicial máxima para una frecuencia de carga de 16hz a una temperatura de 10° C; así mismo, la aplicación de los ciclos de cargas no representa mayor deformación debido a que ha perdido características físicas.

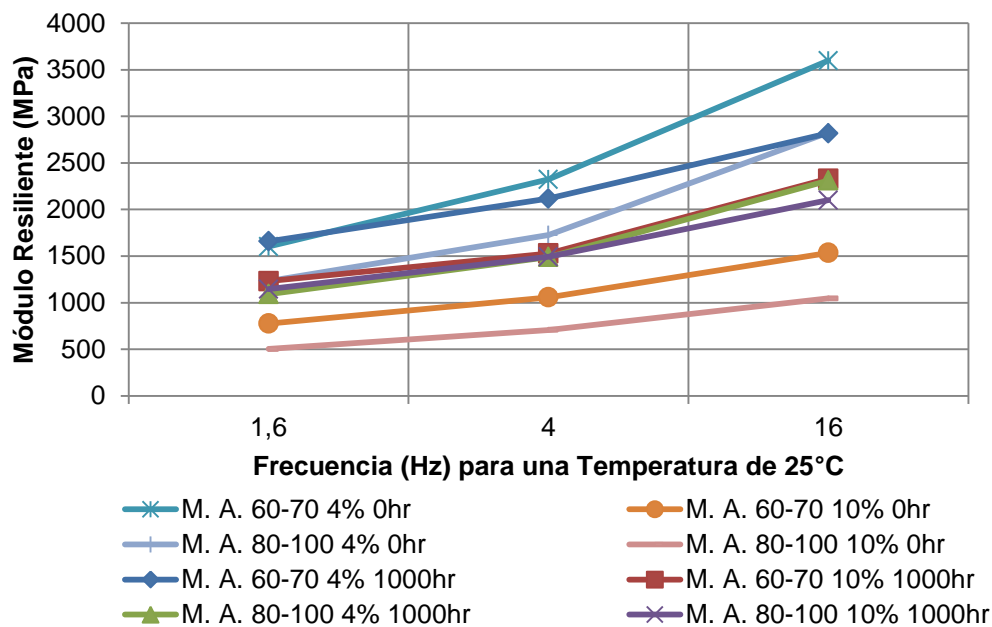


Figura 37 - Comparación de módulo resiliente vs frecuencia de las mezclas asfálticas 60 -70 y 80 – 100 con 4% y 10% de relación de vacíos. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

En la figura 37, se representa un consolidado de los módulos resilientes y las frecuencias de carga para una temperatura de 25°C de las 24 briquetas de mezclas asfálticas de 60 – 70 y 80 – 100 con relación de vacíos de 4% y 10%, de las cuales 12 briquetas se relacionan para un tiempo de 0 horas (sin envejecer) y 12 briquetas con tiempos de exposición en la cámara de ultravioleta a 1000 horas. Esta gráfica registra un incremento en el módulo resiliente a medida que aumenta la frecuencia de carga, la cual está representada por ciclos de carga aplicada.

El consolidado de las mezclas asfálticas de la figura 37, corresponde a un mayor valor de módulo resiliente para las mezclas asfálticas 60 – 70 con porcentajes de vacíos de 4% para los tiempos relacionados, presentando una deformación mayor las briquetas de cero horas(en cámara UV), que las briquetas de 1000 horas(en cámara UV), debido a que las mezclas a cero horas no han experimentado cambios representativos en sus propiedades, mientras las briquetas de 1000 horas presentan un endurecimiento por envejecimiento a través de la cámara

ultravioleta, la cual genera que sea más resistente a la deformación con la aplicación de las frecuencias de cargas.

Para las mezclas asfálticas con relación de vacíos 10% se representa de una manera diferente que las 4% de relación de vacíos debido a que muestran un mayor módulo resiliente las briquetas envejecidas a 1000 horas que las briquetas a cero horas. Con este hecho se puede considerar, que la resistencia a la deformación y recuperación de las mismas, es representativa para las briquetas que fueron sometidas a un proceso de envejecimiento.

El comportamiento de los módulos resilientes, tienen concordancia con investigaciones ampliamente estudiadas como por ejemplo la investigación sobre el comportamiento dinámico de mezclas asfálticas de Vidal J. (2006), al indicar que la “Variación de las propiedades dinámicas se da principalmente por el cambio de temperatura, pues un aumento de ésta genera una disminución en el módulo resiliente. El efecto de la frecuencia de carga, que se manifiesta a través del movimiento de los vehículos pesados sobre la estructura, genera módulos mayores a medida que la velocidad se incrementa”

6.4 ESPECTROSCOPIA

Después de extraer el asfalto de las briquetas de 10 cm x 20 cm sometidas a envejecimiento en la cámara ultravioleta a 100, 200 y 1000 horas, se procedió a realizar el ensayo de espectroscopía, donde arroja valores de longitud de onda en cm^{-1} y valores de transmitancia.

Con estos valores se procede a calcular la absorbancia por medio de la ecuación $A = 2 - \text{Log } T$, obteniendo la gráfica representada en la figura 41.

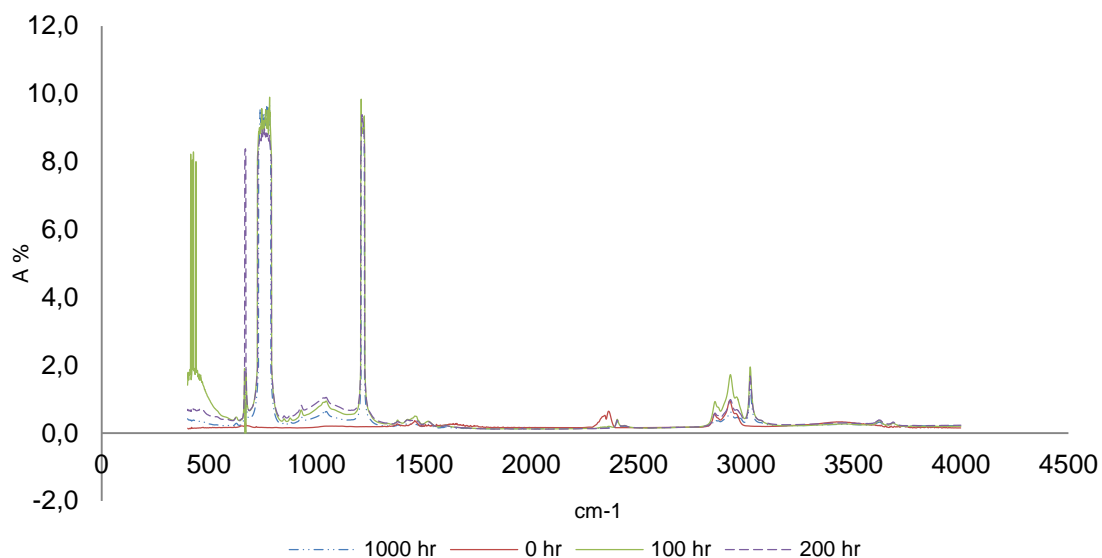


Figura 38 - Absorbancia vs longitud de onda para asfalto 80 – 100. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

En la figura 38, se procedió a determinar el área bajo la curva de la absorbancia en un rango de longitud de onda entre 1470 a 1522 cm^{-1} . Cada curva representa un tiempo de envejecimiento de 0, 100, 200 y 1000 horas para un asfalto de 80 – 100 y así establecer el nivel de oxidación de cada una de las curvas.

Tabla 19 - Relación de áreas bajo curva de absorbancia. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Tiempo	Áreas
0 horas	1,92
100 horas	3,97
200 horas	2,47
1000 horas	1,39

Lo anterior, demuestra que los resultados obtenidos por el método de áreas bajo curva de la prueba de espectroscopía infrarroja, indican un incremento de la oxidación para las mezclas envejecidas a 100, 200, 0 y 1000 horas, sin embargo

este método no refleja una mayor información que permita esclarecer el comportamiento.

Para una mayor interpretación de oxidación de los asfaltos, se cuenta con los indicadores de carboxilos y sulfóxidos, los cuales se relacionan a continuación:

Ind. Carboxilos: $A_{1700} / \Sigma A$

Ind. Sulfóxidos: A_{1032} / A_{1376}

Esto indica, donde o en qué puntos de la gráfica, se evalúan para un determinado intervalo de longitud de onda uno de los tiempos de envejecimiento, obteniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 20 - Cálculo de índices funcionales por espectroscopía (Fuente: Presentación propia de los Autores)

Cálculo de los Índices Funcionales por Espectroscopía IR				
Intervalo	0 horas	100 horas	200 horas	1000 horas
A 2925	0,96	1,71	0,98	0,62
A 2854	0,56	0,93	0,59	0,39
A 1700	0,22	0,16	0,15	0,15
A 1600	0,24	0,23	0,23	0,18
A 1460	0,35	0,50	0,38	0,26
A 1376	0,27	0,38	0,34	0,24
A 1032	0,20	0,91	1,04	0,60
A 724	0,17	1,91	1,74	1,26
Sumatoria	2,97	6,73	5,45	3,70
Ind. Carboxilos	0,075	0,024	0,028	0,041
Ind. Sulfóxidos	0,733	2,407	3,084	2,559

Teniendo en cuenta los índices relacionados en la tabla No.21 obedece a intervalos diferentes, se evidencia que el índice de carboxilo a 0 horas presenta mayor oxidación sobre toda la longitud de onda de absorbancia, donde los asfaltos de 100, 200 y 1000 horas representan valores de absorbancia similares.

Para el índice de sulfóxidos, los asfaltos es inversa al índice de carboxilos, donde se presenta mayor oxidación los asfaltos de 100, 200 y 1000 horas con valores de absorbancia de asfalto de 0 horas, lo que quiere decir que cuanto más largo sea el tiempo, tanto mayor será la oxidación.

En la figura 38 se muestra un notable y evidente comportamiento de oxidación de los asfaltos de 100, 200 y 1000 horas, esta conducta es relativamente lógica en estos tiempos de envejecimiento, pero para un tiempo de 0 horas es atípico este comportamiento, deducimos que se debe a que la oxidación tiene un comportamiento agresivo en las primeras horas de envejecimiento pero tiene un tramo de longitud de onda en el cual se oxida levemente y decrece actuando lentamente.

Esto puede ser lógico ya que si analizamos el envejecimiento de los asfaltos en campo, se evidencia un incremento de oxidación por el oxígeno actuante en los vacíos de la mezcla. Este fenómeno ocurre cuando han pasado solo las primeras horas de envejecimiento, es decir, en un envejecimiento de corto plazo.

Cuando se evalúa el envejecimiento de largo plazo comparado con el de corto plazo, se evidencia notablemente el proceso de oxidación en las primeras horas de envejecimiento ya que el oxígeno (como principal factor de oxidación) ha actuado casi en la totalidad el material asfáltico quedando expuesto a otros factores externos que al igual generan oxidación, aunque ya no tan agresivos.

6.5 MÉTODO S.A.R.A.

El ensayo S.A.R.A. (saturados, aromáticos, resinas y asfaltenos), es una evaluación de tipo química que busca medir a través del fraccionamiento de los grupos funcionales, el tipo de asfalto al cual pertenece, bien sea sólido o fluido.

Los resultados obtenidos de la columna cromatográfica del SARA son:

Tabla 21 - Relación de tiempo de envejecimiento en cámara UV con el tiempo de exposición en años. (Fuente: Presentación propia de los Autores).

ASFALTO	PORCENTAJE DE AROMATICOS	PORCENTAJE DE ASFALTENOS	PORCENTAJE DE RESINAS	PORCENTAJE DE SATURADOS	I.C	I.S
60/70 (original)	28.45	14.20	26.46	16.80	0.56	3.56
80/100 (original)	30.06	9.64	41.26	18.60	0.40	5.89
60/70 (Env. 1000 H)	19.88	18.29	32.5	22.38	0.78	2.67
80/100 (Env. 1000 H)	19.27	16.31	33.04	21.52	0.72	2.92

Las cuatro primeras columnas de la tabla 22, corresponden a los resultados de la cromatografía de la columna SARA y las dos últimas columnas corresponden al índice de inestabilidad coloidal e índice estructural que nos permiten identificar qué tipo de asfalto es más sólido o fluido.

I.C = Índice de Inestabilidad Coloidal (Descrito por Gaestel)

Si $I.C > 0,6$; el asfalto es de tipo gel.

$$IC = \frac{\text{Constituyentes Floculados}}{\text{Constituyentes Dispersos}} = \frac{\text{Saturados + Asfaltenos}}{\text{Aromáticos + Resinas}}$$

I.S = Índice Estructural.

Si I.S < 4 el asfalto es de tipo Gel.

Si I.S está entre 4 y 9 el asfalto es de tipo Sol-Gel.

Si I.S > 9 el asfalto es de tipo Sol.

$$IS = \frac{\text{Resinas}}{\text{Asfaltenos}} + \frac{\text{Aromáticos}}{\text{Saturados}}$$

El asfalto tipo Gel, corresponde a un asfalto que ha adquirido gran número de partículas sólidas, es decir, representa mayor rigidez. El asfalto de tipo Sol, ha adquirido gran número de moléculas dispersas o libres, lo que demuestra un asfalto blando o fluido.

Los siguientes, son algunos autores que se citan, ya que han estudiado a fondo el comportamiento químico de los asfaltos a través del SARA aportando resultados importantes al estado del conocimiento:

Un decrecimiento en la fracción de aromáticos es característico del proceso de envejecimiento de los asfaltos (León, 2001).

Un aspecto importante se deriva de las relaciones existentes en el I.S. ya que con la disminución de los valores de éstas relaciones, debida a la formación de partículas más grandes, se constituye el factor más característico asociado al proceso de envejecimiento , la rigidización.(Romero & Gomez, 2002).

La disminución de compuestos aromáticos y resinas son responsables del endurecimiento. (Romero & Gomez, 2002).

La figura 39 representa un consolidado del fraccionamiento SARA y los índices de inestabilidad coloidal y estructural.

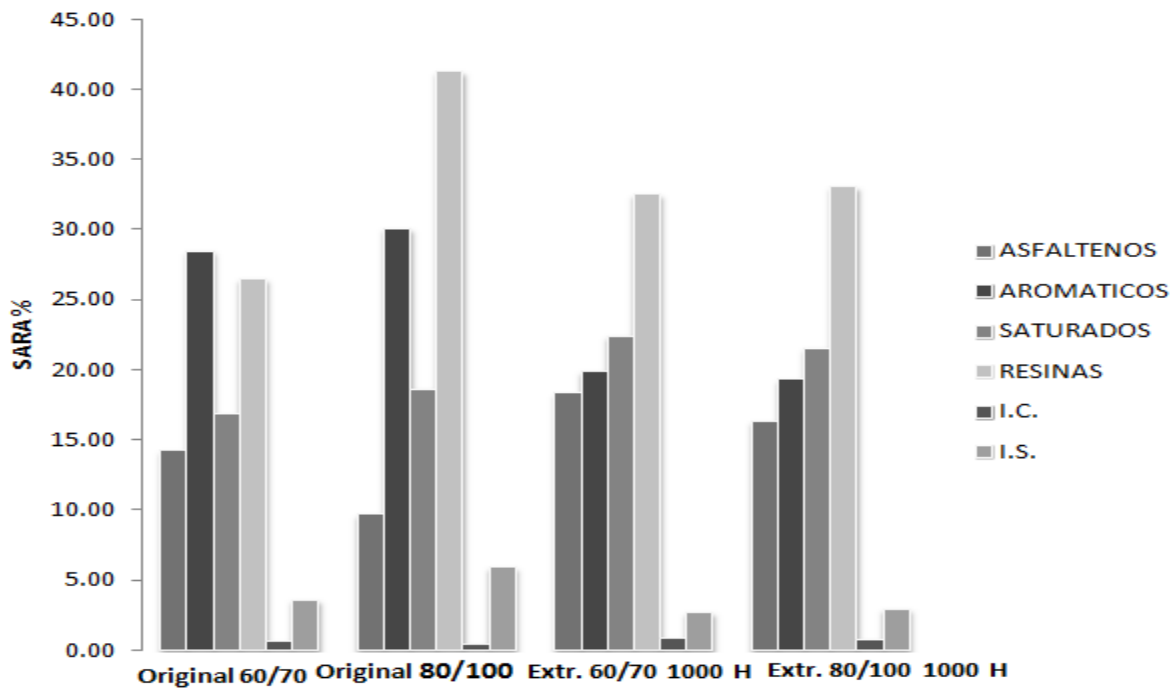


Figura 39 - Consolidado del fraccionamiento SARA y los índices de inestabilidad coloidal y estructural.

De la gráfica (Figura 39) se resalta, que el Índice de Seguridad disminuye con el tiempo y representa un envejecimiento y rigidización, corroborando así la teoría de Romero & Gomez, 2002.

6.6 EFECTO DE LA RADIACION ULTRAVIOLETA EN LAS MEZCLAS ASFALTICAS 60/70 Y 80/100.

Uno de los objetivos de esta investigación es evaluar el desempeño de las mezclas asfálticas 60-70 y 80-100 a través de los efectos de la radiación ultravioleta, sin embargo se debe estudiar a profundidad las variables existentes en los componentes climatológicos de Bogotá D.C. y hacer una relación con las condiciones de operación del equipo. Lo anterior, porque es sabido por investigaciones ya ampliamente estudiadas que la acción del medio ambiente (oxígeno, radiación solar, temperatura ambiente, agua, sales, ácidos (Reyes O & Camacho J, 2005), afectan indudablemente la vida útil de las carpetas asfálticas.

González y Rodríguez (2005), presentan un resumen meteorológico de la ciudad de Bogotá, en donde evalúan la radiación solar ultravioleta y cuya longitud de onda está entre 295 y 400 nm representando un 7% de la radiación total. Las lecturas fueron tomadas a una altura de 2546 msnm donde la longitud de onda de los rayos ultravioletas es aproximadamente de 305 nm y son presentados en la tabla 13.

Tabla 22 - Valores de la radiación solar (kwh/m²/dia) en Bogotá (Fuente: González y Rodríguez,2005).

<i>Mes</i>	<i>Ho</i>	<i>H</i>	<i>H/Ho</i>	<i>Hb</i>	<i>Hb/H</i>	<i>Hd</i>
Enero	9.5	4.66	0.49	2.69	0.58	1.96
Febrero	10.0	4.92	0.49	2.84	0.58	2.08
Marzo	10.4	4.18	0.40	2.10	0.50	2.08
Abril	10.4	3.97	0.38	1.91	0.48	2.06
Mayo	10.1	3.71	0.37	1.72	0.46	1.99
Junio	9.8	3.56	0.36	1.63	0.46	1.93
Julio	9.9	3.76	0.38	1.78	0.47	1.98
Agosto	10.2	3.98	0.39	1.94	0.49	2.04
Septiembre	10.3	4.04	0.39	1.99	0.49	2.06
Octubre	10.1	3.89	0.39	1.91	0.49	1.98
Noviembre	9.6	3.91	0.41	2.01	0.51	1.90
Diciembre	9.3	4.20	0.45	2.31	0.55	1.89
Anual	10.2	4.06	0.41	2.07	0.51	1.99

Donde:

Ho: Radiación Global

H: Radiación Solar promedio diario.

Hb: Radiación Solar directa promedio diario.

Hd: Radiación Solar difusa promedio diario.

Esta investigación parte del supuesto de que la radiación ultravioleta puede causar un envejecimiento del asfalto y por consiguiente una modificación de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla asfáltica. De ahí, la simulación de radiación ultravioleta con cámara UV con períodos de 2 Horas y 10 minutos de condensación.

Es necesario determinar la relación entre el tiempo de exposición de la cámara UV y la radiación promedio en Bogotá D.C., teniendo en cuenta las intensidades en W/m^2 . Según González y Rodríguez (2005), la radiación de intensidad promedio en Bogotá es de $425 W/m^2$.

Para determinar el tiempo de exposición de las briquetas en la cámara UV, se utilizó la ecuación planteada por Reyes O & Camacho J (2005), en la cual parten de los datos meteorológicos tomados por González y Rodríguez (2005).

$$I_i = E_i / t_i A_i \quad (1)$$

Donde,

I_i = Intensidad

E_i = Energía de radiación.

A_i = Área de Radiación.

t_i = tiempo de exposición.

$$I_L = 0.0427 I_B \quad (2)$$

Donde

I_L = Intensidad de la lámpara

I_B = Intensidad de Bogotá.

$$E_L/t_L * A_L = 0.0427 E_B / t_B * A_B \implies T_B = 0.0427 E_B * t_L / E_L \quad (3)$$

Donde

I_L = Intensidad de la lámpara.

I_B = Intensidad de Bogotá.

Se deduce que para calcular la energía de Bogotá y la del laboratorio se utiliza la ecuación de la energía de un fotón (ecuación 4).

$$E = h * c / \lambda \quad (4)$$

Donde

E = Energía

h = Constante de Planck

c = Velocidad de la luz

λ = Longitud de onda

Resolviendo las ecuaciones 3 y 4, se obtiene que:

$$t_B = 28.5 t_L$$

t_B = Tiempo de Exposición en Bogotá.

t_L = Tiempo de exposición de la lámpara.

Debido a que las especificaciones de las lámparas para radiación UV del equipo utilizado en ese estudio son similares al de la presente investigación, se da por

hecho que se puede utilizar la misma ecuación para determinar los tiempos de radiación.

Los tiempos de exposición en la cámara UV de las briquetas oscilan entre 20 y 1000 horas y relacionándolas en años según la ecuación utilizada es:

Tabla 23 - Relación de tiempos de envejecimiento en cámara UV con tiempos de exposición en años. (fuente: presentación propia de los autores).

Tiempo de exposición en cámara UV en horas de envejecimiento	Relación del tiempo de exposición en años según la ecuación $t_b = \frac{t_i}{28.5}$
20	0.0650
50	0.1626
100	0.3253
200	0.6506
500	16.267
1000	32.534

Con estos resultados (Tabla 24), se puede no solo determinar el comportamiento de las mezclas asfálticas en los tiempos planteados para los distintos ensayos dinámicos y químicos sino también estimar las alteraciones que puedan experimentar los materiales en determinados tiempos futuros.

6.7 INDICE DE ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO REPRESENTANDO EL PRIMER AÑO DE SERVICIO

Con el ánimo de encontrar una ecuación que pudiera expresar en términos cuantitativos el índice de envejecimiento a largo plazo de las mezclas asfálticas 60-70 y 80-100, se realiza una comparación con la fórmula planteada por Safwat F. Said (2005), en donde evidencian un endurecimiento por envejecimiento a través del tiempo y está muy relacionado con los resultados obtenidos en ésta investigación.

Safwat F. Said (2005), implementaron la siguiente fórmula para obtener el índice de envejecimiento a largo plazo durante un periodo estimado de 1 año.

$$AI_{PLTA} = \left[\frac{St_1 - St_0}{St_0(t_1 - t_0)} \right] \times 365 \times 100$$

En donde:

AI_{PLTA} = Índice de pre-envejecimiento a largo plazo representado en el primer año de servicio.

S_{t_1} = Módulos Resilientes en t_1

S_{t_0} = Modulo Resilientes en t_0

t_1 = Tiempo Final (en días)

t_0 = Tiempo Inicial (en días)

Al procesar los datos de ésta investigación en la anterior ecuación, se obtienen los resultados de los distintos asfaltos con sus respectivos vacios para un período estimado de un año de servicio.

Cabe resaltar, que los tiempos de la ecuación están dados en días y que en la presente propuesta de investigación el tiempo máximo de envejecimiento es de 1000 Horas.

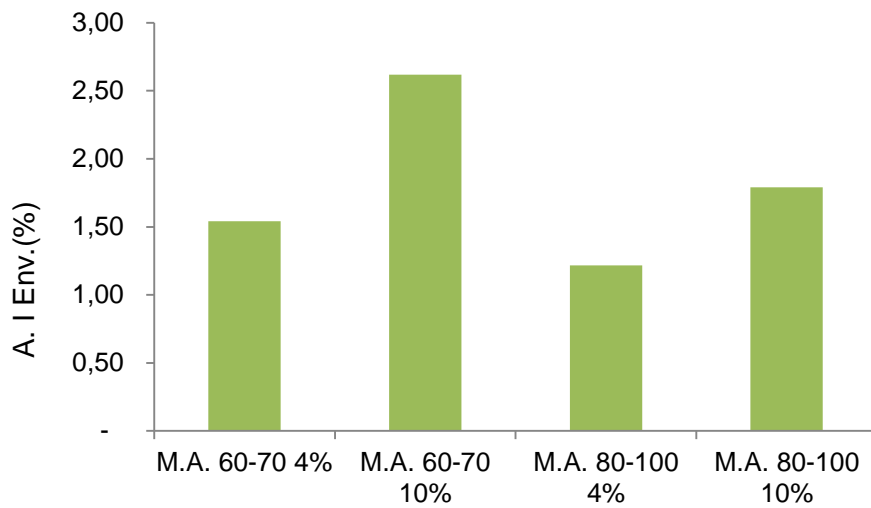


Figura 40 - Índice de pre-envejecimiento a largo plazo estimando un periodo de un año. (Fuente: Presentación propia de los Autores)

La figura 40, refleja que para la mezcla asfáltica envejecida 60-70 aumenta significativamente el endurecimiento por envejecimiento, demostrando así un comportamiento acorde con los conceptos ya estudiados.

En el caso de la mezcla asfáltica envejecida 80-100 se muestra un comportamiento similar aunque no tan notable, sin embargo se parte del mismo concepto que a mayor tiempo de exposición, la mezcla experimenta un mayor endurecimiento por envejecimiento.

7. CONCLUSIONES

Las conclusiones se desarrollaron a partir de las evaluaciones de tipo reológicas, dinámicas y químicas, teniendo en cuenta que éstas hacen parte de los cambios que experimentan los ligantes y las mezclas asfálticas en cuanto al fenómeno del envejecimiento.

Si bien es cierto que la evaluación reológica se desarrolló solo para los ligantes asfálticos, debemos recordar que éstos fueron envejecidos a corto y largo plazo, lo que nos permite de alguna forma hacer comparaciones con los ensayos dinámicos y químicos de las mezclas envejecidas por cámara UV.

Dentro del análisis reológico que hicimos para los ligantes envejecidos por PAV a 20 y 50 horas, se señaló que el módulo complejo es un indicador de la rigidez y que a mayor temperatura el asfalto presenta una mayor oxidación. De ésta manera se demostró, que el asfalto 60-70 envejecido a 50 horas en PAV representó una mayor rigidez que el 80-100.

Siguiendo con nuestro análisis, para el ensayo del módulo resiliente, organizamos un consolidado de tiempos, porcentaje de vacíos, temperatura y número de frecuencias que arrojó una serie de curvas, que nos permitieron medir las deformaciones de cada una de las mezclas asfálticas. Como conclusión, existe una evidente deformación con el incremento de la carga y la temperatura, para los tiempos de cero horas con 4 % y 10% de vacíos. Contrario a los tiempos de 1000 horas de exposición en cámara UV, ya que éstos representan una menor deformación con las mismas condiciones de temperatura, frecuencias y porcentaje de vacíos. Esta pequeña deformación se observó tanto para la mezcla asfáltica 80-100 como para la mezcla 60-70.

En el ensayo de módulo dinámico, interpretamos que a mayor frecuencia de carga, mayor será el incremento del módulo, lo que obliga a pensar que una carpeta asfáltica se deformará menos con el incremento de la frecuencia de carga. Dentro del consolidado de tiempos de envejecimiento, se aplica ésta hipótesis ya que las mezclas con tiempos de exposición mayores (como las de 1000 horas), representan mayores módulos dinámicos y especialmente la mezcla asfáltica 60-70 con 4 % de vacíos.

Analizando los procesos de evaluación química que se llevaron a cabo para las mezclas asfálticas 60-70 y 80 – 100 con tiempos de exposición en cámara UV de 1000 horas, se concluye que en cuanto al ensayo del SARA se corrobora lo dicho por Romero y Gomez, 2002, con lo que tiene que ver que a mayor índice estructural mayor envejecimiento y rigidización. Gráficamente se evidencia que las extracciones que se le practicaron a las mezclas asfálticas con tiempos de exposición en cámara UV, demostraron un mayor envejecimiento frente a los asfaltos originales.

Teniendo en cuenta el análisis desde el punto de vista reológico, dinámico y químico, tanto de las mezclas asfálticas como de los ligantes asfálticos y correlacionando los resultados obtenidos, deducimos que indudablemente si existe envejecimiento por endurecimiento, rigidización u oxidación con la exposición de las mezclas asfálticas en la cámara ultravioleta. Cabe resaltar, que éste fenómeno es más evidente con la evaluación dinámica y reológica que con la evaluación química, dado que la oxidación es el factor más importante en éste proceso pero también la que más se ve afectada por factores externos.

8. BIBLIOGRAFIA

Petersen, (2009). A review of the fundamentals of asphalt oxidation. Chemical, physicochemical, physical property, and durability relationships.

Said, S. (2005). Aging Effect on Mechanical Characteristics of Bituminous Mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1901(-1), 1–9. doi:10.3141/1901-01

Ralf Metzlera, Theo F. Nonnenmacherb (2001) Fractional Relaxation Processes And Fractional Rheological Models For The Description Of A Class Of Viscoelastic Materials.

Bell, Abwahab y Cristi (1991) Investigation Of Laboratory Aging Procedures For Asphalt – Aggregate Mixtures. *Transportation Research Record* 1323.

Bianchetto, H. D., Miró Recasens, J. R., & Pérez Jiménez, F. E. (2011). Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de fílleres comerciales. Primera parte: estudios en base al método UCL. Recuperado a partir de <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/2834>

Chávez Valencia, L. E., & Hernández-Barriga, C. (2009). Estado del Arte y Perspectiva del Envejecimiento de los Pavimentos Asfálticos. *Acta Universitaria*, 19(1), 30–39.

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Lopez, G., & A, J. (2004). Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas. *publicación técnica*, (255). Recuperado a partir de <http://trid.trb.org/view.aspx?id=1100426>

Rondón Quintana, H., Fernández Gómez, W., & Castro López, W. (2010). Evaluación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente modificada con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD). *Revista ingeniería de construcción*, 25(1), 83–94. doi:10.4067/S0718-50732010000100004

Martinez, G., & Caicedo, B. (2005, 23). Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/1992/747>

Vargas, x., & Reyes, f. (2010). El fenómeno del envejecimiento de los asfaltos. *Revista Ingeniería e Investigación*, VOL. 30 No. 3, pp. 27–44.

Rondón, H., Reyes, F., & Vacca, H. (2010, diciembre). Caracterización dinámica de una mezcla asfáltica sometida a las condiciones ambientales de Bogotá. *Escuela de Ingeniería De Antioquia*, p. 135 – 145.

<http://es.scribd.com/doc/52283919/1/definiciondeasfalto>.

<http://www.definicionabc.com/general/asfalto.php>.