



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Desempeño a Fatiga y Ahuellamiento de Mezclas en Servicio en la Ciudad
de Bogotá, Comparadas con Mezclas Envejecidas en Laboratorio en
Cámara UV

Presentado por:

Sandra Patricia Roncallo Contreras
Freddy Bautista Rondón

Director:

Fredy Alberto Reyes Lizcano

Bogotá D.C. Noviembre de 2013

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Desempeño a fatiga y ahuellamiento de mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá, comparadas con mezclas envejecidas en laboratorio en cámara UV.”, desarrollado por los estudiantes Sandra Patricia Roncallo y Freddy Bautista Rondón, 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

Freddy Alberto Reyes Lizcano

Jurado 1

Jurado 2

**Desempeño a Fatiga y Ahuellamiento de Mezclas en Servicio en la
Ciudad de Bogotá, Comparadas con Mezclas Envejecidas en
Laboratorio en Cámara UV**

Sandra Patricia Roncallo Contreras

Freddy Bautista Rondón

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

RESUMEN

Los daños prematuros en la infraestructura vial de Bogotá, son atribuibles en gran parte al desconocimiento del desempeño de las mezclas asfálticas frente a los efectos producidos por las condiciones climáticas de la ciudad. En esta tesis de maestría se presenta un estudio del desempeño a fatiga y ahuellamiento de mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá, comparadas con mezclas envejecidas en el laboratorio en cámara UV. Para ello se utilizó, una mezcla MDC-2 elaborada con asfalto 80-100 proveniente de Barrancabermeja, con la cual se fabricaron las muestras de laboratorio. Por otro lado, se extrajeron muestras de pavimento en servicio en la ciudad de Bogotá con el mismo tipo de mezcla. Las muestras fabricadas en el laboratorio se envejecieron en cámara UV durante 100, 200 y 500 horas y las muestras extraídas de campo fueron de edades de 1.5, 3 y 5 años. A estas muestras se les realizaron ensayos de fatiga y ahuellamiento determinando que las mezclas asfálticas presentan un comportamiento de rigidización producto del envejecimiento por oxidación causada por la radiación ultravioleta – UV. De igual manera, se encontró que 500 horas de envejecimiento en cámara UV corresponden a 1.5 años de envejecimiento en campo para el ensayo de fatiga.

Palabras clave: Envejecimiento, fatiga, ahuellamiento, radiación UV

ABSTRACT

The early damages in the Bogota road infrastructure are greatly due to the lack of knowledge of asphaltic mixtures performance as well as the climate conditions in the city. In this Master Degree thesis, it is presented a study of resistance to permanent deformation of mixtures in Bogota city. Moreover, these mixtures are compared with mixtures that have been aged in the UV chamber in a laboratory. In order to do this comparison, it was used a MCD2 mixture made out of asphalt 80-100 penetration graded. This asphalt came from the city of Barrancabermeja which at the same time was used in the laboratory samples. On the other hand, there were obtained pavement mixtures in Bogota city using the same type of sample. The samples were aged in the UV chamber during 100, 200 and 500 hours. The samples were obtained from the field and were 1.5, 3 and 5 years old. There were realized tests of resistance to permanent deformation to the samples. The study showed that the asphaltic mixtures became stiffed due to the aging by oxidation caused by the ultraviolet radiation (UV). In the same way, it was determined that the 500 hours of aging in the UV chamber, corresponded to 1.5 years of aging in the field for the fatigue test.

Keywords: Aging, fatigue, rutting, UV radiation.

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN | 2 |
| 1.2 OBJETIVO GENERAL | 4 |
| 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 4 |
| 1.4 SÍNTESIS | 5 |
| 2. MARCO CONCEPTUAL | 6 |
| 2.1 ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS | 6 |
| 2.2 TIPOS DE ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS | 6 |
| 2.2.1 <i>Envejecimiento a corto plazo de la mezcla asfáltica</i> | 7 |
| 2.2.2 <i>Envejecimiento a largo plazo de la mezcla asfáltica</i> | 7 |
| 2.3 MECANISMOS DE DAÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN EL DISEÑO | 8 |
| 2.3.1 <i>Fatiga en las mezclas asfálticas</i> | 8 |
| 2.3.2 <i>Ahuellamiento en las mezclas asfálticas</i> | 10 |
| 3. ANTECEDENTES | 12 |
| 3.1 AFECTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EFECTO DE LOS RAYOS UV | 12 |
| 3.1.1 <i>Investigaciones internacionales</i> | 12 |
| 3.1.2 <i>Investigaciones locales</i> | 16 |
| 4. METODOLOGIA | 20 |
| 4.1 SELECCIÓN DE AGREGADOS Y TIPO DE ASFALTO | 21 |
| 4.1.1 <i>Caracterización del asfalto utilizado</i> | 21 |
| 4.1.2 <i>Caracterización del agregado pétreo utilizado</i> | 22 |
| 4.1.3 <i>Diseño de la mezcla asfáltica</i> | 23 |
| 4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL | 24 |
| 4.2.1 <i>Fabricación de las muestras en laboratorio</i> | 26 |
| 4.2.2 <i>Envejecimiento en cámara UV</i> | 27 |
| 4.2.3 <i>Ensayos de fatiga</i> | 28 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.4 | <i>Ensayos de ahuellamiento</i> | 30 |
| 5. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 32 |
| 5.1 | COMPORTAMIENTO A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS | 32 |
| 5.1.1 | <i>Resultados de los ensayos de deformación permanente para las muestras envejecidas en laboratorio.</i> | 32 |
| 5.1.2 | <i>Resultados de los ensayos de deformación permanente para la muestras obtenidas en campo</i> | 36 |
| 5.1.3 | <i>Comparación entre las muestras de campo y las muestras envejecidas en laboratorio</i> | 38 |
| 5.2 | COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE LA MUESTRAS ENSAYADAS | 41 |
| 5.2.1 | <i>Resultados de los ensayos de fatiga para las muestras envejecidas con cámara UV en laboratorio.</i> | 41 |
| 5.2.2 | <i>Resultados de ensayos de fatiga para muestra envejecidas en condiciones reales</i> | 44 |
| 5.2.3 | <i>Comparación entre las muestras de campo y las muestras envejecidas en laboratorio</i> | 46 |
| 6. | CONCLUSIONES | 49 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA | 51 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 4-1 Ensayos realizados en el cemento asfáltico..... | 21 |
| Tabla 4-2 Ensayos realizados sobre el agregado pétreo | 22 |
| Tabla 4-3 Granulometría para mezcla asfáltica tipo MDC-2..... | 24 |
| Tabla 4-4 Resumen de briquetas y ensayos realizados | 25 |
| Tabla 5-1 Resultados velocidad de deformación plástica de las muestras MDC-2 envejecidas en laboratorio | 35 |
| Tabla 5-2 Resultados de la velocidad de deformación plástica para las muestras MDC-2 de campo envejecidas en condiciones reales..... | 38 |
| Tabla 5-3 Comparación de la velocidad de deformación plástica entre muestras MDC-2 envejecidas en condiciones reales en campo y en cámara UV en laboratorio | 40 |
| Tabla 5-4 Comparación de la vida a fatiga de las mezclas MDC-2 envejecidas en laboratorio | 42 |
| Tabla 5-5 Valores de pendiente de la línea fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras envejecidas en laboratorio. | 43 |
| Tabla 5-6 Comparación de la vida a fatiga de las mezclas MDC-2 envejecidas en sitio..... | 45 |
| Tabla 5-7 Valores de línea de pendiente de fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras de campo | 46 |
| Tabla 5-8 Valores obtenidos de la línea de pendiente de fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras MDC-2 campo y laboratorio | 48 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1-1. Estado de la malla vial de Bogotá en diciembre de 2012..... | 2 |
| Figura 2-1. Agrietamiento por fatiga | 9 |
| Figura 2-2 Curva típica esfuerzo deformación en un ciclo de carga y descarga ... | 11 |
| Figura 3-1 Acumulación de la deformación permanente entre mezclas fabricadas por el método de compactación Marshall y SUPERPAVE. Temperatura de ensayo 40°C..... | 14 |
| Figura 3-2 Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento (t) para las mezclas fabricadas con CA-80-100..... | 17 |
| Figura 3-3 Comparación módulo complejo a 10 rad/seg con respecto al tiempo de radiación UVB para 52°C, 58°C y 64°C (película de 2 mm de espesor)..... | 19 |
| Figura 4-1 Flujo de la metodología aplicada | 20 |
| Figura 4-2 Mezclado, compactación y desmoldado de muestras para ensayos de fatiga | 26 |
| Figura 4-3 Muestra preparada antes de su ingreso a la cámara UV. | 27 |
| Figura 4-4 Disposición de muestras para fatiga y ahuellamiento en la cámara UV. | 28 |
| Figura 4-5 Bancos de fatiga utilizados en la investigación | 29 |
| Figura 4-6 Dimensiones de las muestras para ensayos de fatiga..... | 29 |
| Figura 4-7 Equipo para ensayo de ahuellamiento utilizado en la investigación | 30 |
| Figura 5-1 Progreso de la deformación permanente muestras MDC-2 envejecidas en laboratorio | 33 |
| Figura 5-2 Evolución del ahuellamiento con el tiempo de envejecimiento muestras de laboratorio | 34 |
| Figura 5-3 Progreso de la deformación permanente muestras MDC-2 envejecidas en campo | 36 |
| Figura 5-4 Evolución del ahuellamiento con el tiempo de envejecimiento muestras de campo | 37 |

| | |
|---|----|
| Figura 5-5 Comparación de comportamientos a la deformación permanente muestras MDC-2 campo y laboratorio..... | 39 |
| Figura 5-6 Leyes de fatiga para muestras MDC-2 envejecidas con cámara UV en laboratorio | 42 |
| Figura 5-7. Leyes de fatiga de muestras MDC-2 envejecidas en condiciones ambientales reales | 44 |
| Figura 5-8 Comparación de comportamientos a la fatiga de las muestras MDC-2 campo y laboratorio..... | 47 |

1. INTRODUCCIÓN

El envejecimiento de las mezclas asfálticas y su incidencia sobre el comportamiento mecánico y dinámico de estas, han sido durante décadas tema de estudio en diferentes investigaciones. Las causas de los daños en las mezclas asfálticas no solo están determinadas por las condiciones de carga, sino también por las condiciones ambientales a las que se ven sometidas durante su vida útil. Dichas condiciones ambientales contribuyen al envejecimiento de las mezclas asfálticas haciéndolas susceptibles a la falla (Chávez & Hernández, 2009), (Vallerga et al, 1957).

Los daños prematuros en la infraestructura vial son atribuibles en parte al desconocimiento del desempeño de las mezclas frente a los efectos producidos por las condiciones ambientales regionales, como la radiación solar, temperatura y lluvia entre otros. Lo anterior repercute de manera negativa en la durabilidad de los pavimentos y hace que las entidades encargadas de la conservación de la infraestructura vial, deban hacer inversiones no previstas en la rehabilitación de los mismos.

De acuerdo con diferentes investigaciones a nivel mundial, una de las variables ambientales que afecta de manera importante el comportamiento de las mezclas asfálticas son los rayos UV (Vallerga et al, 1957), (Traxler, 1963), (Edler et al, 1985), (Montepara et al, 1996), (Bocci & Cemi, 2000), (Afanasieva et al, 2002). (Hagos, 2008). Sin embargo, precisar el comportamiento de las mezclas asfálticas por efectos de la radiación UV, motiva a realizar nuevas investigaciones

considerando las condiciones ambientales propias del sitio de instalación de la mezcla.

La siguiente investigación, toma como caso particular la afectación de la radiación UV, sobre las mezclas asfálticas instaladas en la ciudad de Bogotá elaboradas con asfalto 80–100, de tal manera que contribuya a predecir el comportamiento de estas desde la etapa de diseño.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En el año 2012 el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), entidad encargada de la construcción y mantenimiento de la infraestructura vial de la ciudad de Bogotá D.C, presentó su informe de gestión con la siguiente información entre otros: A diciembre de dicho año, la malla vial de la ciudad posee una longitud de 15.348 kilómetros carril, de los cuales el 95% (14.580,6 km-carril) corresponden al subsistema vial y el 5% (767,4 km-carril) al subsistema de transporte (Troncales Transmilenio)(IDU, 2012). Excluyendo los carriles del sistema Transmilenio para esa fecha el 71% de la malla vial se encontraba en estado deficiente como se muestra en la Figura 1-1.

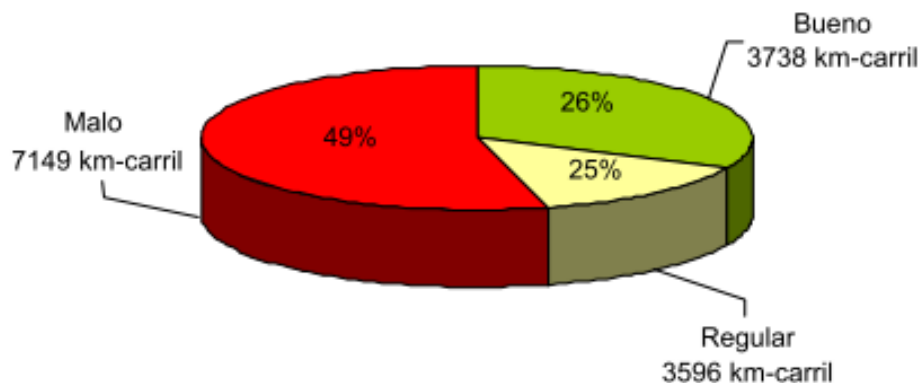


Figura 1-1. Estado de la malla vial de Bogotá en diciembre de 2012

Fuente: (IDU, 2012)

En enero del año 2013, se estiman que los costos en los cuales debe incurrir la ciudad para el mantenimiento y rehabilitación de su malla vial ascienden a 7.2 billones de pesos de acuerdo con las declaraciones de la directora de la Unidad de Mantenimiento Vial de Bogotá (Gómez, 2012). Considerando lo anterior como grandes inversiones por cuenta de la ciudad para la rehabilitación prematura de los pavimentos instalados.

Gran parte del deterioro prematuro del pavimento de la ciudad, se debe al comportamiento de los materiales que lo conforman frente a las exigencias climáticas que se presentan en la ciudad. Colombia presenta valores de radiación solar de 4.0 a 5.0 kWh/m²/día, cercanos a los de Arabia Saudita, el país que mayor radiación solar recibe en el mundo con valores de entre 5.0 a 6.9 kWh/m²/día. Ciudades como Bogotá reciben valores entre 3.56 a 4.92 kWh/m²/día, más de la mitad de la referencia árabe (Ministerio de Minas y Energía, 2005)(Caicedo & Martínez, 2005).

Los efectos nocivos de la radiación solar sobre el comportamiento de las mezclas asfálticas han sido tema de diferentes investigaciones a nivel local, (Martínez & Caicedo, 2005), (Reyes & Camacho, 2008), (Rondón & Reyes, 2009), (Fernández, et al, 2013) entre otras. Adicionalmente, la Cámara Colombiana de Infraestructura en su documento “*Propuesta técnica para garantizar la homogeneidad de los asfaltos producidos en las refinerías Colombianas*” señala entre otras conclusiones, la necesidad de desarrollar investigaciones interinstitucionales que tengan como finalidad el fundamentar unas especificaciones de ligantes bituminosos y mezclas asfálticas, más acordes a nuestro medio (Arenas, 2009).

Basado en lo anterior, surgen diferentes oportunidades para desarrollar líneas de investigación que van desde establecer nuevas especificaciones para la

fabricación de ligantes bituminosos acordes a las condiciones climáticas de Colombia, hasta lograr una mejor predicción del comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la acción nociva de las condiciones ambientales regionales. En este sentido y entendiendo la necesidad de mejorar dicha predicción del comportamiento de las mezclas, esta investigación se orienta a establecer una relación en tiempo, de las mezclas envejecidas artificialmente en laboratorio con rayos UV, con las mezclas envejecidas naturalmente por efectos de los mismos rayos provenientes del sol, tomando como base un asfalto 80-100 procedente de la refinería de Barrancabermeja y mediante la utilización de ensayos a fatiga y ahuellamiento reconocidos a nivel mundial, como parámetros de revisión en el diseño de dichas mezclas.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Establecer la relación entre el comportamiento a fatiga y ahuellamiento de la mezcla MDC-2 elaborada con asfalto 80-100, después de ser sometida a procesos de envejecimiento en cámara UV, y el comportamiento del mismo tipo de mezcla en servicio en la ciudad de Bogotá.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el comportamiento a fatiga y ahuellamiento de las mezclas asfálticas MDC-2 envejecidas en laboratorio con cámara UV.
- Determinar el comportamiento a fatiga y ahuellamiento de las mezclas asfálticas MDC-2 en servicio en Bogotá.
- Obtener una curva que relacione tiempos de falla de las mezclas envejecidas en el laboratorio con las mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá.

1.4 SÍNTESIS

Este documento inicia presentando en su capítulo 2, el marco conceptual sobre los temas relevantes que se abordan en esta investigación; en el capítulo 3 se presentan las investigaciones similares y resultados obtenidos de ellas; en el capítulo 4 se presenta la metodología utilizada para la investigación referida particularmente a la selección de los materiales y a la fase experimental; en el capítulo 5 se presentarán los resultados obtenidos, las coincidencias y diferencias entre esta investigación y otras similares; en el capítulo 6 las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones. Por último en el capítulo 7 se mencionan las referencias bibliográficas sobre la cual se apoya este proyecto.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

De manera general, el envejecimiento corresponde a un proceso lento e irreversible de alteración de las propiedades físicas y químicas de determinado material. Para el caso específico de las mezclas asfálticas, el envejecimiento se refiere al proceso de oxidación que experimentan estas durante sus etapas de fabricación, instalación y servicio.

Diferentes investigaciones concluyeron que el envejecimiento de las mezclas asfálticas asociados a factores climáticos, varían la composición química de las fracciones SARA de sus asfaltos (saturados, asfáltenos, resinas y aromáticos). Algunas de estas investigaciones determinaron que con respecto a sus valores originales, los asfáltenos aumenta de manera significativa mientras que las resinas, aromáticos y saturados disminuyen. (Afanasjeva et al., 2002), (Reyes et al, 2012). Lo anterior es de gran importancia en el estudio del comportamiento de las mezclas envejecidas si se tiene en cuenta que a la fracción de asfáltenos se les atribuyen algunas características estructurales de los asfaltos como dureza y resistencia.

2.2 TIPOS DE ENVEJECIMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas durante el proceso de fabricación en planta y extensión o instalación en sitio, experimentan importantes procesos de oxidación debido a factores como la temperatura, la presión, la humedad, radiación y tiempo. El

proceso de oxidación de la mezcla, es el fenómeno mediante el cual el oxígeno actúa en los componentes químicos del asfalto trayendo como consecuencias, el endurecimiento, pérdida de la consistencia viscoelástica, fisuración y agrietamiento. (Parada et al, 2005). Este proceso de oxidación es lo que comúnmente se conoce como envejecimiento de las mezclas, el cual dependiendo del momento en que ocurra se define como de corto y largo plazo.

2.2.1 Envejecimiento a corto plazo de la mezcla asfáltica

El envejecimiento a corto plazo de la mezcla asfáltica, corresponde a la pérdida de los componentes volátiles y oxidación del asfalto durante la fase de fabricación e instalación de la mezcla en sitio (Bell et al, 1991).

Desde la punto de vista químico durante el proceso de producción en planta e instalación, la mezcla asfáltica pierde componentes volátiles del cemento asfáltico, el oxígeno reacciona con los hidrocarburos para producir peróxidos que a su vez, reaccionan con los compuestos azufrados presentes en el cemento asfáltico obteniendo de ello los sulfóxidos (Chávez & Hernández, 2009).

La norma ASTM D 2872 establece las condiciones para la simulación del envejecimiento a corto plazo de los asfaltos, utilizando el horno de película delgada RTFO según la metodología establecida por el Programa Estratégico de Investigación en Carreteras (Por sus siglas en ingles SHRP).

2.2.2 Envejecimiento a largo plazo de la mezcla asfáltica

El envejecimiento a largo plazo de la mezcla asfáltica, corresponde a la oxidación progresiva de esta mientras esta en servicio (Bell et al., 1991). Durante este proceso, se presenta un incremento en la fracción de asfaltenos mientras que los

naftenos aromáticos experimentan disminución y se convierten en polar aromáticos, hay oxidación de carbones bencílicos y se producen sulfóxidos y cetonas independientemente de la presión parcial de oxígeno y de la temperatura (Chávez & Hernández, 2009)

El SHRP, recomienda simular el envejecimiento a largo plazo en laboratorio mediante la utilización de una combinación de RTFO+PAV coherente esto con lo recomendado por la norma AASHTO MP1.

2.3 MECANISMOS DE DAÑO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS UTILIZADAS EN EL DISEÑO

Uno de los retos en el diseño de las mezclas asfálticas para la ingeniería de pavimentos, corresponde a predecir y controlar el comportamiento elastoplástico de la mezcla frente a los principales mecanismos de daño estructural que sobre ella actúan. Para el caso de las mezclas asfálticas las propiedades mecánicas que se deben controlar, son la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) y la resistencia a la fatiga.

Las cargas cíclicas aplicadas por el paso de vehículos sobre la estructura de pavimento, son consideradas como las principales generadoras de falla. Lo anterior, teniendo en cuenta que los pavimentos llegan a ella, debido al grado de deformación y agrietamiento que han sufrido durante su vida útil, disminuyendo así la calidad de servicio hasta índices de rechazo.

2.3.1 Fatiga en las mezclas asfálticas

En las mezclas asfálticas las repeticiones de carga inducen la generación de micro-fisuras en el extremo inferior de la carpeta asfáltica de un pavimento flexible. La acumulación con la repetición de dichas cargas, generan fisuras mayores que

se propagan de manera ascendente hacia la parte superior de la carpeta asfáltica, en donde se reflejan de forma paralela en el sentido del tráfico, que terminan formando piezas angulares conocidas como “*piel de cocodrilo*”.(Rondón & Reyes, 2011), (Garnica et al, 2002). Ver Figura 2-1.



Figura 2-1. Agrietamiento por fatiga

Fuente:(Garnica et al., 2002)

Cuando el proceso ocurre por los cambios de temperatura sobre la superficie de la carpeta asfáltica, las microfisuras se forman por lo general de manera descendente y en el sentido transversal al flujo del tráfico.

De acuerdo con Rodríguez (2000), durante el proceso de agrietamiento por fatiga se conocen dos fases. La primera conocida como fase de iniciación, donde aparecen y se propagan una red de micro-fisuras que se extienden a lo largo de la mezcla y generan la disminución de la rigidez de esta. La segunda fase conocida como fase de propagación donde las microfisuras se unen entre sí, dando origen a fisuras de mayor tamaño que se propagan en el material. La rigidez de la mezcla asfáltica, determina la velocidad de aparición y propagación de cada una de las fases.

En el diseño mecanicista de los pavimentos asfálticos, el comportamiento a fatiga hace parte de las variables de diseño que se controlan durante la determinación

de los espesores de las capas a instalar. El Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) entidad encargada de la infraestructura vial de Bogotá, utiliza para el diseño de sus pavimentos la metodología basada en el diseño racional. Es así como en esta metodología, la fatiga se controla mediante la deformación a tracción máxima (ϵ_t), que puede experimentar la capa asfáltica en la fibra superior mediante el uso de la siguiente ecuación.

$$\epsilon_t = \epsilon_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_c k_s k_t k_r$$

Donde ϵ_6 corresponde a la amplitud de deformación necesaria para que el material falle a 10^6 ciclos de carga y b la pendiente de la línea de fatiga en un ensayo con deformación controlada. NE corresponde al número de ejes equivalentes de 13 toneladas y los parámetros de k_c , k_s , k_t y k_r corresponden a coeficientes correctores relacionados con el comportamiento de material en laboratorio y sitio, rigidez de la capa de soporte, temperatura de la zona construcción y factor de seguridad de diseño respectivamente (Rondón & Reyes, 2011).

2.3.2 Ahuellamiento en las mezclas asfálticas

El ahuellamiento en mezclas asfálticas es un proceso de deformación vertical permanente que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, formando huellas o depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de llantas (Rondón & Reyes, 2009).

Durante la aplicación de carga y descarga sobre una mezcla asfáltica, parte de la deformación total generada (ϵ_T) se recupera (deformación resiliente, ϵ_r), mientras que, otra parte no se recupera y se acumula (deformación permanente, ϵ_p). La acumulación de estas deformaciones en los pavimentos generan fallas funcionales

y/o estructurales (Rondón & Reyes, 2009) Ver Figura 2-2

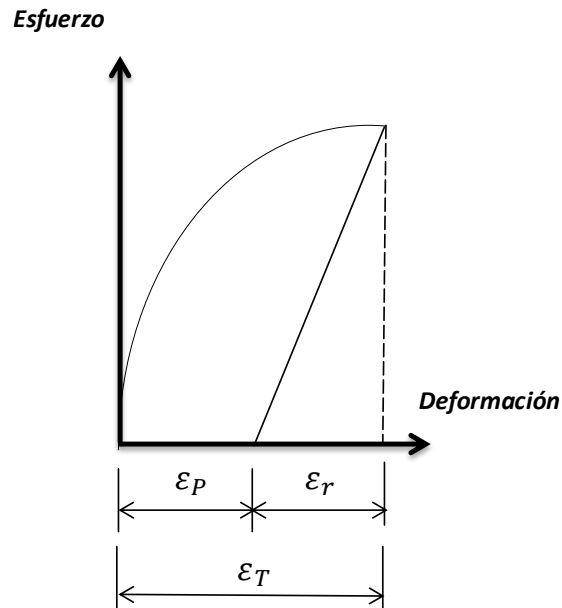


Figura 2-2 Curva típica esfuerzo deformación en un ciclo de carga y descarga

Fuente: (Rondón & Reyes, 2009)

Existen principalmente tres factores que contribuyen de manera directa al ahuellamiento de las mezclas asfálticas: La mezcla (gradación del agregado, tipo y contenido de asfalto), carga (presión de llantas, tipo de ejes) y ambiente (temperatura humedad y precipitación) (Tarefder et al, 2003).

Aunque el proceso de deformación permanente y la formación de huellas se producen tanto en la subrasante como en las capas inferiores de la mezcla, es precisamente esta última la que preocupa a los diseñadores de las mezclas asfálticas. Las causas que aumentan la magnitud de este proceso están directamente relacionadas a la baja compactación de la mezcla, el exceso de ligante asfáltico dentro de la mezcla, elevada temperatura de la zona acompañada del ligante asfáltico blando y altos volúmenes de tráfico con cargas elevadas (Rondón & Reyes, 2009).

3. ANTECEDENTES

3.1 AFECTACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS POR EFECTO DE LOS RAYOS UV

3.1.1 Investigaciones internacionales

Lopes et al (2012), estudiaron el envejecimiento en la superficie de la mezcla asfáltica basados en que la oxidación es influida por la temperatura, la radiación ultravioleta y las características intrínsecas del material. Dentro de su metodología, extrajeron núcleos de mezclas asfálticas en campo de diferentes edades con el fin de tener varios centímetros de espesor. Para conocer las condiciones de envejecimiento en la superficie del pavimento y evaluar su influencia en las características de adhesión, se recuperó la superficie del asfalto dado que es la que se expone a los rayos ultravioleta y a la intemperie. El método de recuperación del aglutinante del asfalto fue validado por la espectrometría de infrarrojo a través de la comparación de del aglutínate de asfalto puro joven y viejos. Además, se desarrolló un envejecimiento acelerado con el uso de una cámara climática compuesto de ajustes de brillo, humedad y tiempo adicionado, relacionado con el clima de Francia. Los resultados del envejecimiento obtenidos en el laboratorio y en el campo se compararon utilizando el mismo método de ensayo. Esta comparación permitió establecer que hay un factor acelerador con respecto al aumento del grupo de sulfóxido y carboxilo. Este estudio proporciona una mejor comprensión de la influencia del envejecimiento sobre la resistencia y la capacidad del material para resistir pulimiento.

Puello y Afanasjeva (2009), estudiaron técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos. Dentro de su metodología, estudiaron dos asfaltos colombianos y uno venezolano mediante técnicas instrumentales, con el fin de comparar parámetros composicionales, funcionales y estructurales, desde el punto de vista del proceso de envejecimiento termo-oxidativo acelerado. Las técnicas usadas fueron la separación asfáltenos - máltenos por precipitación y filtración, cromatografía líquida en columna empacada para el fraccionamiento de máltenos, espectrometría de infrarrojo con transformada de Fourier (FIRT), y osmometría de presión de vapor (VPO). Encontraron que el envejecimiento cambia la composición fraccional de los asfaltos, el peso molecular de los asfaltos y sus respectivas fracciones de asfáltenos y máltenos, y los parámetros funcionales y estructurales del mismo, concluyendo que es posible caracterizar los asfaltos mediante las técnicas instrumentales, dado que permiten detectar cambios en la composición y estructura de los asfaltos.

Hagos (2008), estudió el efecto del envejecimiento sobre las propiedades del concreto asfáltico poroso. Dentro de su metodología utilizaron especímenes envejecidos en el laboratorio y en campo. Además de los métodos convencionales de envejecimiento a corto y largo plazo del asfalto en el laboratorio, propuso un envejecimiento de la mezcla asfáltica en condiciones ambientales, que combina los principales factores que influyen en el envejecimiento en campo como lo son la temperatura, los rayos UV y la humedad. Se realizaron tres combinaciones de envejecimiento, AP1: Temperatura, AP2: Temperatura + UV, AP3. Temperatura + UV + Humedad. Los ligantes de campo fueron recuperados a partir de muestras tomadas de los tramos de carretera inmediatamente después de la construcción y después de 1, 3, 7 y 12 años de vida de servicio. Se realizaron diferentes ensayos a las muestras de laboratorio y las de campo para realizar la caracterización reológica, mecánica y química del asfalto, con el fin de entender los efectos del

envejecimiento. Como resultado de la investigación planteó que el envejecimiento del asfalto como consecuencia de los efectos del medio ambiente se considera un principal factor que contribuye a la falta de cohesión y menor vida útil del asfalto. Los resultados reológicos y químicos muestran que el envejecimiento del laboratorio no simula más de tres (3) años de envejecimiento en campo.

Khan & Kamal, (2008) Diseñaron y compactaron mezclas utilizando las metodologías de SUPERPAVE y Marshall e hicieron la comparación de comportamientos a la deformación permanente y módulo resiliente, mediante pruebas de resistencia a la tracción indirecta, ensayos de creep y sensibilidad a la humedad. Reportaron que la mezcla diseñada por el método SUPERPAVE, experimentó mayor resistencia a la deformación permanente y rigidez que aquellas diseñadas por el método Marshall, como se observa en la Figura 3-1.

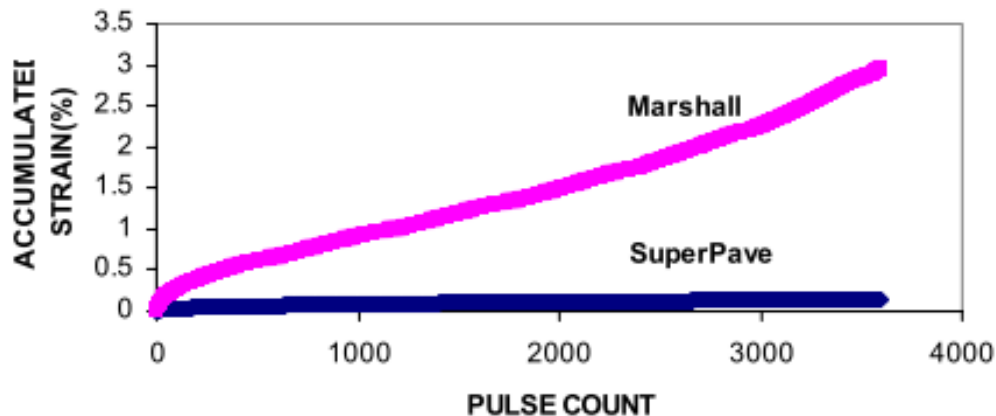


Figura 3-1 Acumulación de la deformación permanente entre mezclas fabricadas por el método de compactación Marshall y SUPERPAVE. Temperatura de ensayo 40°C

Fuente: (Khan & Kamal, 2008)

Wang et al (2008), estudiaron el efecto del envejecimiento en el comportamiento a fatiga del asfalto. Para ello compararon muestras envejecidas artificialmente mediante el RTFOT y PAV con muestras envejecidas mediante la exposición

natural al aire libre durante doce (12 meses). Para la base asfáltica determinaron que el efecto de envejecimiento sobre el comportamiento a fatiga es tendiente a disminuir. Adicionalmente, determinaron que la vida a fatiga después de tres (3) meses de envejecimiento natural es casi el mismo que después del envejecimiento en PAV

Montepara y Giuliani (2000), estudiaron el cambio en la composición química de los ligantes asfálticos, durante la exposición a altas temperaturas, determinando que estos cambios se deben inicialmente a los procesos de oxidación. Durante el proceso de mezcla (corto plazo) el peso molecular incrementa junto con el endurecimiento. A largo plazo la oxidación se presenta de manera acelerada por la acción de los rayos UV. Dentro de las conclusiones, presentaron que el envejecimiento por técnicas de radiación UV simulan mejor las condiciones in situ del ligante con respecto a ensayos de RTFO y PAV en la parte superficial de la mezcla expuesta.

Kliewer (1995), estudió la razón del envejecimiento en campo y en el laboratorio. Las mezclas asfálticas elaboradas en el laboratorio se envejecieron en un horno a una temperatura de 135° a baja exposición térmica durante 4 h (envejecimiento de la mezcla durante su fabricación en planta) y a alta exposición térmica en un horno a 85° durante 4 días (simulación de 10 años de envejecimiento). La razón de envejecimiento se determinó con el módulo resiliente (MR) concluyendo que las mezclas asfálticas expuestas a baja exposición térmica depende del tipo de agregado, dado que para agregados pétreos básicos, se presentó un envejecimiento bajo y para ácidos fue alto. En las mezclas asfálticas sometidas a exposición alta, el envejecimiento depende del tipo de agregado y cemento asfáltico, entre mayor sea la adhesión en la mezcla asfáltica se tiene una mayor mitigación del envejecimiento.

Bell (1989), estudió el envejecimiento de sistemas asfalto-agregado. Concluyó que los métodos más recomendados para evaluar la durabilidad a largo tiempo de las mezclas asfálticas son el envejecimiento en horno, oxidación bajo presión, tratamiento con luz ultravioleta, tratamiento con humedad y para corto tiempo calentamiento y tratamiento con microondas.

3.1.2 Investigaciones locales

Fernández et al,(2013), estudiaron los efectos del medio ambiente en los asfaltos colombianos. Dentro de los materiales y métodos utilizaron ligantes asfálticos colombianos 60-70 (AC-20) y 80-100 (AC-30), los cuales fueron sometidos a envejecimiento mediante The Rolling Thin Film Oven (RTFO), the Pressure Aging Vessel (PAV) y la cámara de radiación ultravioleta diseñada especialmente para el proyecto. Las propiedades físicas se evaluaron por penetración, ductilidad y punto de ablandamiento. La evaluación química se realizó mediante espectroscopia de infrarrojo (FTIR) como complemento de Corbett SARA fractions. Las propiedades reológicas se realizaron mediante el reómetro de corte dinámico (DSR). Finalmente, compararon los aspectos físicos, químicos y reológicos de los ligantes asfálticos originales y envejecidos. Determinaron que los ligantes asfálticos envejecidos a corto plazo experimentan una recuperación de la ductilidad y del módulo complejo debido a un aumento en las fracciones de resina. Por otro lado, encontraron que el tratamiento RTFO produjo resultados similares en los aglutinantes de asfalto después de 100 h de radiación UV. Por último las pruebas químicas demostraron que durante el envejecimiento a corto plazo, ácidos grasos saturados y aromáticos nafténicos se convierten en resinas, resultado de la oxidación, hasta que la producción de estas resinas se detiene. Luego, en el envejecimiento a largo plazo las resinas se convierten en asfáltenos.

Rondón & Reyes, (2012) estudiaron el envejecimiento de mezclas asfálticas en

condiciones ambientales reales en la ciudad de Bogotá. Los materiales utilizados fueron mezclas tipo MDC-2 fabricada con cementos asfálticos 80-100, 60-70 y uno modificado 20-40. Dentro de su metodología, realizaron la caracterización de los materiales granulares y del cemento asfáltico. El diseño de la mezcla asfáltica fue realizado por el método Marshall, con el cual elaboraron briquetas que fueron colocadas en el techo de un edificio para quedar expuestas al medio ambiente de la ciudad de Bogotá D.C. La evolución de las propiedades dinámicas fueron evaluadas mediante la evolución del módulo resiliente, deformación permanente, ensayo de fatiga y la rigidez Marshall. La evolución química fue evaluada mediante el ensayo SARA y la influencia del agua en las propiedades físicas y oxidación fueron evaluadas mediante penetración, punto de ablandamiento, viscosidad y ductilidad, obteniendo los siguientes resultados:

- El módulo resiliente tiende a aumentar con el tiempo de exposición al ambiente y por lo tanto la tendencia general de la resistencia a la deformación permanente es aumentar. Este fenómeno es debido principalmente al envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico por efectos de temperatura, humedad y exposición a radiación ultra-violeta. Ver Figura 3-2

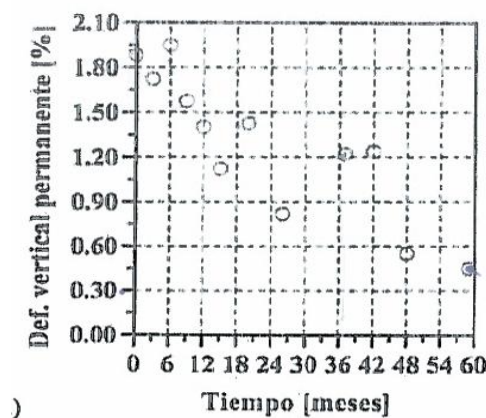


Figura 3-2 Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento (t) para las mezclas fabricadas con CA-80-100

Fuente: (Rondón & Reyes, 2012)

- Disminución en los valores de las fracciones de los aromáticos lo cual es característico de del proceso de envejecimiento.
- El porcentaje de resinas disminuye dado que están constituidas por compuestos aromáticos polares muy susceptibles a la oxidación dada la naturaleza estructural.
- La penetración disminuye con el tiempo de inmersión en agua. En 12 meses la penetración disminuye en un 26 %.
- Incremento en el punto de ablandamiento del 8% en 12 meses
- Incremento en la viscosidad del 20% en 12 meses
- Se observa una disminución del valor del ϵ_{\max} (amplitud de la deformación para que el material falle cuando se aplican N_f ciclos de carga) a medida que incrementa el módulo resiliente de la mezcla (E), lo que equivale a un estado en el cual el material está cambiando su comportamiento dúctil a frágil por rigidización.
- Disminución de la ductilidad en un 17%

Reyes y Camacho (2008) estudiaron el efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica. Dentro de su metodología, fabricaron muestras de módulo dinámico, de ahuellamiento y de ley de fatiga, utilizando un asfalto Barrancabermeja, granulometría MD10 empleada para la construcción de pavimentos en la ciudad de Bogotá, las cuales fueron sometidas a cuatro periodos de radiación ultravioleta (450, 900 y 1350 horas) en

una cámara con condiciones ambientales controladas. Para la mezcla se determinó, 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. Teóricamente determinaron que periodos de exposición de 450, 900 y 1350 horas corresponde o son equivalentes a 1.46, 2.93 y 4.4 años respectivamente

Caicedo y Martínez (2005) estudiaron el efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas. Para la mezcla se determinó la profundidad hasta la cual el envejecimiento fotoquímico afecta el material, y se encontró una relación lineal entre el envejecimiento y el tiempo de exposición. Demostraron que la radiación ultravioleta sí influye de manera notable en el envejecimiento del ligante Barranca 80-100, y sobre todo en las mezclas como se muestra en la Figura 3-3. Esta influencia es más notoria durante los primeros meses de servicio, etapa en la que la mezcla inicia el proceso de endurecimiento por envejecimiento. A medida que pasa el tiempo los primeros milímetros de la rodadura tienden a endurecerse más rápido que el resto del espesor de la capa.

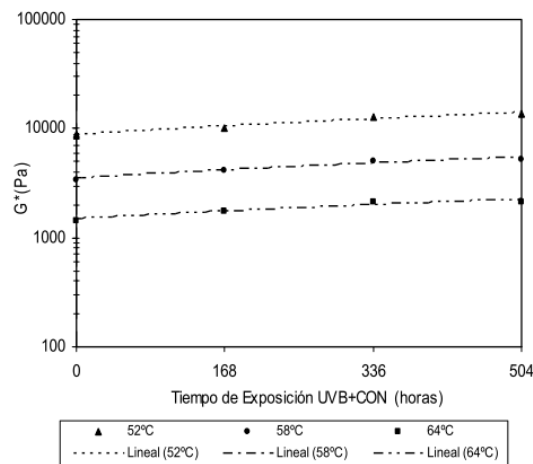


Figura 3-3 Comparación módulo complejo a 10 rad/seg con respecto al tiempo de radiación UVB para 52°C, 58°C y 64°C (película de 2 mm de espesor).

Fuente: Martínez y Caicedo (2005).

4. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los objetivos planteados en esta investigación, se fabricaron muestras en el laboratorio de mezclas tipo MDC-2 y se extrajeron otras de pavimentos en servicio de Bogotá del mismo tipo de mezcla elaboradas con asfalto de penetración 80-100. A estas muestras, se les realizaron ensayos de fatiga y ahuellamiento de tal manera que permitiese analizar y comparar el comportamiento entre ellas. Para lo anterior, se cumplió con la metodología esquematizada en la Figura 4-1.

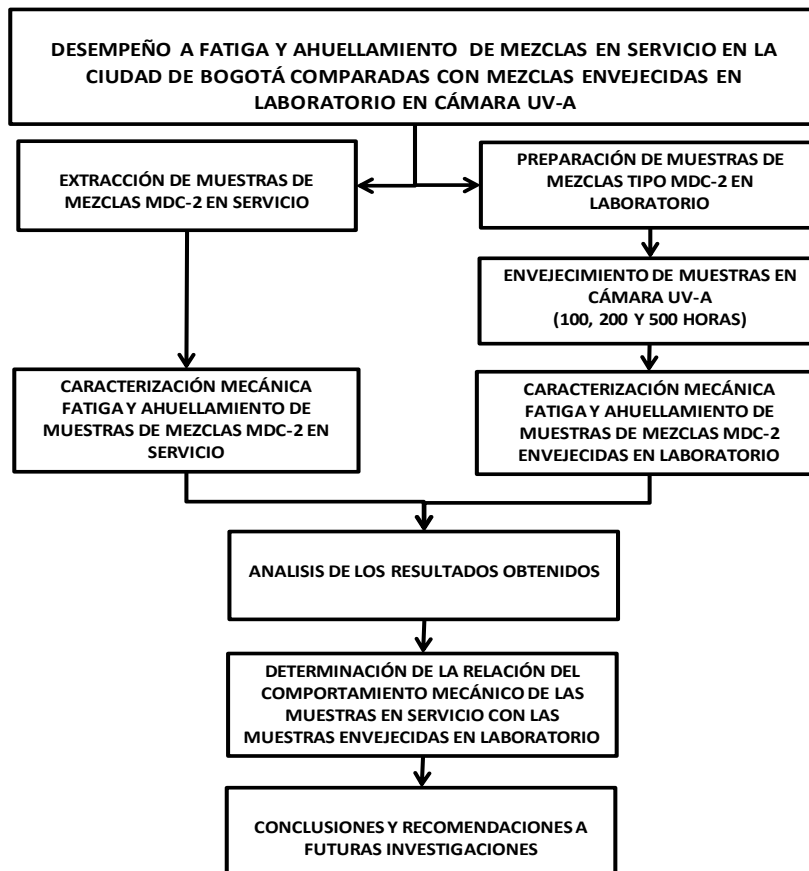


Figura 4-1 Flujo de la metodología aplicada

4.1 SELECCIÓN DE AGREGADOS Y TIPO DE ASFALTO

Teniendo en cuenta que el objeto del estudio se orienta al desempeño de las mezclas asfálticas en Bogotá, se emplearon materiales comunes en la construcción de la infraestructura vial de la ciudad, cuya especificación se ajusta a lo solicitado en los artículos 400-07 del INVIAS y la especificación técnica ET-510-11 del Instituto de Desarrollo Urbano.

4.1.1 Caracterización del asfalto utilizado

Para la fabricación de las muestras de laboratorio, se utilizó asfalto de penetración 80-100 de origen Barrancabermeja, suministrado por la Pontificia Universidad Javeriana para fines experimentales. En la Tabla 4-1 se presentan los resultados de los ensayos realizados al cemento asfáltico seleccionado

Tabla 4-1 Ensayos realizados en el cemento asfáltico

Fuente:(Vera, 2012)

| CARACTERISTICA | UNIDAD | NORMA ENSAYO INVIAS | GRADO DE PENETRACIÓN | | |
|--|--------|---------------------------|----------------------|-----|-----------|
| | | | 80 - 100 | | |
| | | | Mín | Máx | Resultado |
| Penetración (25°C, 100 g, 5 s) | 0.1 mm | E-706 | 80 | 100 | 83.2 |
| Índice de penetración | - | E-724 | -1 | +1 | 0.26 |
| Ductilidad (25° C, 5 cm/min) | cm | E-702 | 100 | - | 144.5 |
| Contenido de agua | % | E-704 | - | 0.2 | < 0.2 |
| Gravedad específica (25°C) | - | - | - | - | 1 |
| Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland | °C | E-709 | 230 | - | 358 |
| Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 75 minutos). | % | E-720 | - | 1 | 0.3 |
| Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento (E-720), en % de la penetración original. | % | E-706 | 48 | - | 60.8 |
| Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento (E-720). | °C | E-712 | - | 9 | 4 |

Los resultados presentados en la tabla anterior, hacen parte de los obtenidos por el grupo de investigadores CECATA de la Pontificia Universidad Javeriana. La especificación técnica del asfalto utilizado, corresponde a la establecida en la norma INVIAS (Artículo 400-07) seleccionado de acuerdo con las características climáticas de la región. Para el caso Bogotá, este asfalto es de amplia utilización en la construcción de su infraestructura vial.

4.1.2 Caracterización del agregado pétreo utilizado

El agregado pétreo empleado para la elaboración de la mezcla asfáltica MDC-2 utilizada en esta investigación, fue suministrado por la firma Concrecol S.A. proveniente de la fuente de materiales del Río Coello en el Departamento del Tolima, que garantiza el cumplimiento de las especificaciones INVIAS para dicho material. En la Tabla 4-2 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización de este material.

Tabla 4-2 Ensayos realizados sobre el agregado pétreo

Fuente:(Vera, 2012)

| CARACTERÍSTICA | UNIDAD | NORMA ENSAYO INVIAS | ESPECIFICACIÓN INVIAS | | Resultados |
|--|--------|------------------------|--------------------------|-----|------------|
| | | | Mín | Máx | |
| Gravedad específica del llenante mineral | - | E-128-07 | - | - | 2.73 |
| Equivalente de arena | % | E-133-07 | 50 | - | 58 |
| Desgaste Los Ángeles | % | E-218-07 | - | 25 | 28.6 |
| Pérdida en ensayo de solidez Sulfato de Magnesio | % | E-220-07 | - | 18 | 4.1 |
| Gravedad específica y absorción de agregado fino | - | E-222-07 | - | - | 2.48/1.7 |
| Gravedad específica y absorción de agregado grueso | - | E-223-07 | - | - | 2.59/1.6 |
| Partículas fracturadas mecánicamente | % | E-227-07 | 85 | - | 87-7 |

| CARACTERÍSTICA | UNIDAD | NORMA ENSAYO INVIAS | ESPECIFICACIÓN INVIAS | | Resultados |
|-------------------------------|--------|------------------------|---------------------------------------|-------------------|------------|
| | | | Mín | Máx | |
| | | | Indice de alargamiento y aplanamiento | % | |
| Desgaste Micro- Deval | % | E-235-07 | - | 10 ⁽¹⁾ | 4.8 |
| Partículas planas y alargadas | % | E-238-07 | - | 20 | 10.4 |
| Valor de azul de metileno | % | E-240-07 | - | 10 | 1.4 |

(1) Valores especificados para bases y subbases granulares.

Al igual que en el cemento asfáltico, estos resultados hacen parte de los obtenidos por el grupo de investigadores CECATA de la Pontificia Universidad Javeriana.

4.1.3 Diseño de la mezcla asfáltica

Conocidos los resultados de los ensayos de agregado pétreo y cemento asfáltico, se empleó el método Marshall (INV. E-748 INVIAS 2007) para determinar el contenido óptimo de asfalto de la mezcla. Se utilizó este método teniendo en cuenta que es el exigido en Colombia para el diseño de las mezclas de concreto asfáltico y esta investigación busca simular de la mejor manera las condiciones de los pavimentos instalados en Bogotá. El contenido de asfalto obtenido para la mezcla objeto de esta investigación fue del 5.7%.

La dosificación de agregado grueso, fino y llenante mineral, se ajustan a la granulometría solicitada por INVIAS para este tipo de mezcla. En la Tabla 4-3 se presenta la granulometría especificada.

Tabla 4-3 Granulometría para mezcla asfáltica tipo MDC-2

Fuente:(INVIAS, 2007)

| Tamiz # | Tamiz (mm) | Esp. MDC-2 | %pas. Acum | % ret. Acum | % retenidos |
|---------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 3/4 | 19.00 | 100 | 100.0 | 0.00 | 0.00 |
| 1/2 | 12.50 | 80 - 95 | 93.0 | 7.00 | 7.00 |
| 3/8 | 9.50 | 70 - 88 | 79.0 | 21.00 | 14.00 |
| N°4 | 4.75 | 49 - 65 | 57.0 | 43.00 | 22.00 |
| N°10 | 2.00 | 29 - 45 | 40.0 | 60.00 | 17.00 |
| N°40 | 0.43 | 14 - 25 | 22.0 | 78.00 | 18.00 |
| N°80 | 0.18 | 8 - 17 | 12.5 | 87.50 | 9.50 |
| N°200 | 0.075 | 4 - 8 | 6.0 | 94.00 | 6.50 |
| Fondo | | | 0.0 | 100.00 | 6.00 |

Los datos obtenidos del ensayo Marshall y el contenido de asfalto, fueron suministrados por el Grupo de Investigación CECATA, de la Pontificia Universidad Javeriana.

4.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

En la metodología definida para la fase experimental de esta investigación, establecieron dos etapas generales así:

La primera etapa de la investigación consistió en la elaboración de muestras en laboratorio, que posteriormente fueron envejecidas en cámara UV en tiempos de 100, 200 y 500 horas. Una vez envejecidas las muestras fueron sometidas a ensayos de fatiga y ahuellamiento para determinar el comportamiento mecánico de la muestra.

La segunda etapa inicia con la identificación de muestras en campo con edades de instalación de 0 a 2 años, 2 a 4 años y 4 a 8 años, localizadas en sitios donde su exposición a la solicitud de carga vehiculares fuese nula o muy baja. Una vez

obtenidas estas muestras, se les realizaron ensayos de fatiga y ahuellamiento para determinar al igual que las muestras fabricadas en laboratorio, su comportamiento mecánico. En la Tabla 4-4 se presenta el resumen de briquetas y ensayos realizados durante la investigación.

Tabla 4-4 Resumen de briquetas y ensayos realizados

| MUESTRAS FABRICADAS EN LABORATORIO | | | | | |
|---|---|------------|------------|------------|----------------------|
| Tipo de Ensayo y norma | Número de muestras con envejecimiento UV (horas) | | | | Total Ensayos |
| | 0 | 100 | 200 | 500 | |
| (*)Fatiga NFP-98-260 | 12 | 12 | 12 | 12 | 4 |
| Ahuellamiento INV-756-07 | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 |

| MUESTRAS EXTRAIDAS DE SITIOS EN SERVICIO | | | | | |
|---|--|------------|------------|--|---|
| Tipo de Ensayo y norma | Número de muestras con envejecimiento en sitio (años) | | | | |
| | 0-2 | 2-4 | 4-8 | | |
| (*)Fatiga NFP-98-260 | 12 | 12 | 12 | | 4 |
| Ahuellamiento INV-756-07 | 1 | 1 | 1 | | 3 |

(*) Para cada línea de fatiga se requieren 12 briquetas trapezoidales

La preparación de las muestras para cada uno de estos ensayos, se realizó en el caso de las fatigas, con base en la norma Francesa NFP-98-260, mientras que los ensayos de ahuellamiento se realizaron con base en la norma INVIAS INV-756-07.

Para el caso de las muestras extraídas de sitios en servicio, todas se obtuvieron en Bogotá en las siguientes ubicaciones: Parqueadero Hotel Habitel localizado en la Av El Dorado 100-97 edad 5 años, Constructora CONFASE S.A Av. Circunvalar con calle 26 edad 3 años y Constructora CONFASE S.A Av. Circunvalar con calle 25B edad 1.5 años.

El criterio general utilizado para la escogencia de estas muestras, correspondió a realizar su extracción en los sitios donde estas hubiesen experimentado menores cargas cíclicas o permanentes que afectaran su comportamiento a los posteriores ensayos. Para el caso de las muestras del parqueadero se tomaron de las zonas

externas a los puestos de estacionamiento, mientras que para las extraídas de la Av. Circunvalar, se tomaron en el carril rápido junto al separador central.

4.2.1 Fabricación de las muestras en laboratorio

De acuerdo con la Tabla 4-4, fue necesaria la elaboración de 48 briquetas trapezoidales para obtener cuatro líneas de fatiga y 8 briquetas cuadradas para realizar la misma cantidad de ensayos de ahuellamiento.

En el caso de las muestras para ensayos de fatiga, se prepararon especímenes rectangulares en un molde metálico con dimensiones de 50cm x 30cm x 3cm, las cuales fueron compactadas con prensa tipo universal con una carga de 60 toneladas aplicada de manera gradual durante 5 minutos. Luego de compactada la muestra, se dejaba durante 2 días antes de desmoldar e iniciar el proceso de envejecimiento en cámara UV. Ver Figura 4-2



Figura 4-2 Mezclado, compactación y desmoldado de muestras para ensayos de fatiga

En el caso de las muestras para ensayos de ahuellamiento, se prepararon especímenes cuadrados en un molde metálico con dimensiones de 30cm x 30cm x 5cm y se continuó con el procedimiento establecido en la norma INVIAS (INV E-756-07) para los ensayos de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas. La temperatura del ensayo fue 60°C, la carga de 900 kN/m² y la toma

periódica de datos de ahuellamiento se realizó de acuerdo con el numeral 5.1 de dicha norma.

4.2.2 Envejecimiento en cámara UV

Previo a ingresar las muestras en la cámara UV, se confinaron de manera lateral mediante la utilización de tensores plásticos y tablillas de madera. Lo anterior cumplía con dos propósitos, el primero era evitar que la muestra fuese envejecida por sus caras laterales teniendo en cuenta que el envejecimiento real por rayos UV en sitio se produce sobre la cara superior y el segundo, evitar fisuraciones o desprendimientos durante el proceso de radiación y condensación. En la Figura 4-3 se presenta la muestra previa a ser ingresada a la cámara UV.



Figura 4-3 Muestra preparada antes de su ingreso a la cámara UV.

La cámara UV utilizada marca ATLANTEC cuenta con ocho lámparas cuya radiación en longitud de onda es de 340 nm cada una, equivalente a 0.77 W/m²/nm, en el rango de los rayos UVA. La temperatura fijada para períodos alternos de dos horas de radiación y condensación fue de 60° y 50° respectivamente. Las muestras elaboradas fueron sometidas a tiempos de exposición de 0, 100, 200 y 500 horas definidas con base a los resultados de investigaciones previas similares como las de Reyes & Camacho (2008) y Caicedo

& Martínez (2005). En la Figura 4-4 se presenta la disposición de muestras en la cámara UV.



Figura 4-4 Disposición de muestras para fatiga y ahuellamiento en la cámara UV.

Este procedimiento de envejecimiento en cámara UV, se aplicó de igual manera para las muestras utilizadas en los ensayos de ahuellamiento, como para las muestras utilizadas en los ensayos de fatiga.

4.2.3 Ensayos de fatiga

Las muestras envejecidas en cámara UV y extraídas en servicio, fueron ensayadas a fatiga de tipo flexión simple con deformación controlada, de acuerdo con la norma europea NFP-98-260. Estos ensayos se realizaron con el fin de analizar la evolución del comportamiento de la resistencia a la fatiga y su rigidez en los diferentes tiempos de envejecimiento establecidos en esta metodología.

Para la ejecución de los ensayos a fatiga se utilizó el equipo mostrado en la Figura 4-5, que pertenece a la Pontificia Universidad Javeriana. Este equipo utiliza un mecanismo de flexión por tracción, que consiste en someter cuatro probetas trapezoidales apoyadas en sus extremos a un desplazamiento constante, donde el criterio de falla de cada probeta se define como la respuesta del material cuando

llega al 50% de la carga inicial. Sin embargo si la probeta se rompe antes de llegar al 50% del registro inicial, también se considera fallada.



Figura 4-5 Bancos de fatiga utilizados en la investigación

Para la ejecución de este ensayo se utilizó una frecuencia de 10 Hz a temperatura ambiente (en promedio 20°C). Se fabricaron 12 probetas por cada tiempo de envejecimiento en laboratorio y sitio, de dimensiones acordes con la norma (Ver Figura 4-6). Para cada tiempo de envejecimiento evaluado, se realizaron tres niveles de amplitud: 90µm, 150µm y 220 µm con el propósito de obtener las leyes de fatiga.

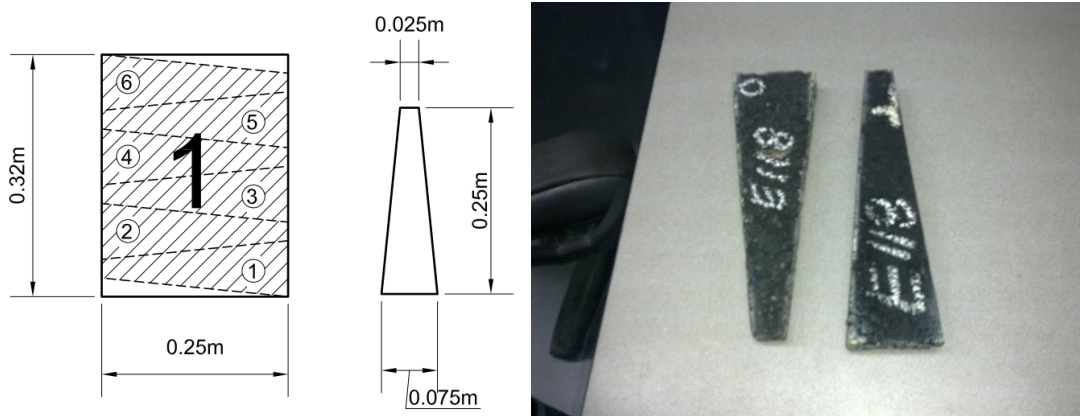


Figura 4-6 Dimensiones de las muestras para ensayos de fatiga

De los ensayos de fatiga realizados y las gráficas obtenidas de estos, se

obtuvieron dos importantes parámetros para el diseño racional de pavimentos. El primero de ellos es la pendiente de fatiga “b” y el segundo corresponde al valor de deformación “ ϵ_6 ” establecido para un millón de repeticiones. Juntos, definen una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga.

Obtenidas las curvas de resistencia a la fatiga para cada uno de los tiempos de envejecimiento, se superponen con el propósito de establecer una relación entre los tiempos de envejecimiento en laboratorio con cámara UV, con los tiempos de las muestras obtenidas de sitios en servicio.

4.2.4 Ensayos de ahuellamiento

Las muestras envejecidas en cámara UV y las extraídas de sitios en servicio, fueron ensayadas para obtener su resistencia a la deformación permanente tomando como base la norma INVIAS (INV E-756-07). Para el caso de las envejecidas en cámara UV, se ensayaron dos muestras por cada tiempo de envejecimiento mientras que, para el caso de las obtenidas de sitios en servicio, se ensayó una muestra por cada edad de servicio. Para la ejecución del ensayo de ahuellamiento se utilizó el equipo mostrado en la Figura 4-7 perteneciente al laboratorio de pavimentos de la Pontificia Universidad Javeriana.



Figura 4-7 Equipo para ensayo de ahuellamiento utilizado en la investigación

El ensayo se realizó a una temperatura constante de 60°C, haciendo pasar una rueda metálica de 900 kN/m² y tomando valores de deformaciones totales en tiempos de 1, 3 y 5 minutos. A continuación, se tomaron medidas cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

Las curvas obtenidas de resistencia a la deformación permanente para cada uno de los tiempos de envejecimiento, se superponen con el propósito de establecer una relación entre los tiempos de envejecimiento en laboratorio con cámara UV, con los tiempos de las muestras obtenidas de sitios en servicio.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

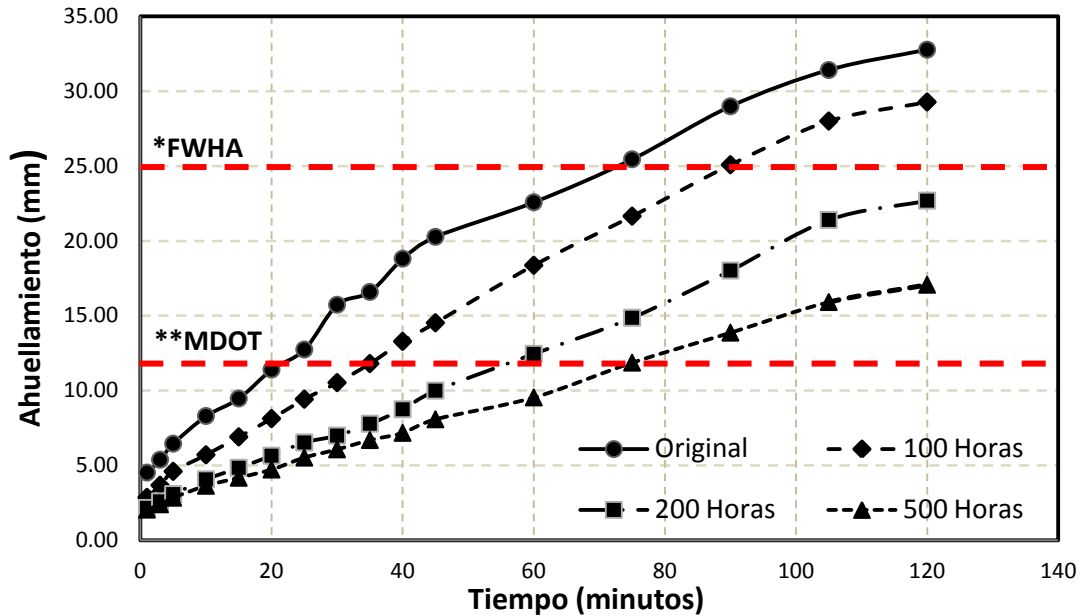
5.1 COMPORTAMIENTO A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

Como se estableció en la metodología de esta investigación, se realizaron ensayos de resistencia a la deformación permanente de las muestras envejecidas artificialmente mediante el uso de la cámara UV, y muestras envejecidas en condiciones ambientales reales tomadas de sitios en servicio de la ciudad de Bogotá. Los resultados obtenidos durante este proceso, se presentan a continuación de manera individual y posteriormente se realiza la comparación entre los comportamientos de las muestras de laboratorio con las muestras de campo para buscar una relación entre ellas:

5.1.1 Resultados de los ensayos de deformación permanente para las muestras envejecidas en laboratorio.

En la Figura 5-1 se presenta el ahuellamiento obtenido, para cada una de las muestras elaboradas y envejecidas de manera artificial en cámara UV, para los tiempos de envejecimiento establecidos en la metodología de esta investigación.

De acuerdo con esta figura, en la medida que avanza el tiempo de exposición en cámara UV de cada una de las muestras ensayadas, se aumenta la resistencia al ahuellamiento.



* Federal Highway Administration, MDOT, ** Michigan Department of Transportation

Figura 5-1 Progreso de la deformación permanente muestras MDC-2 envejecidas en laboratorio

Para el caso de la muestra envejecidas a 500 horas, se observa que dicha reducción en el ahuellamiento alcanza el 47.93% a los 120 minutos del ensayo con respecto a la mezcla sin exposición en cámara UV (Original). Para las muestras de 100 y 200 horas de exposición, esta reducción alcanza valores de 10.67% y 30.78%, respectivamente.

Resultados con tendencia similar a los obtenidos en esta investigación se evidencian en otras investigaciones como la realizada por Reyes & Camacho en el 2008, donde se reportan valores de disminución del ahuellamiento de 26%, para una edad de envejecimiento de 400 horas. Es importante tener en cuenta que en dicha investigación se utilizó una mezcla tipo MD10 cuya gradación es más fina que la MDC-2.

Con respecto a los valores de ahuellamiento máximo obtenidos en esta

investigación, se observa que son superiores respecto a los límites admisibles recomendados por algunas de las agencias estadounidenses de infraestructura (Figura 5-1). Esta situación infiere una revisión de las causas que pueden incrementar el ahuellamiento desde el diseño de la mezcla hasta el tipo de ligante asfáltico utilizado. Investigaciones como las de Sivapatham & Beckedahl (2006) han demostrado que asfaltos menos penetrables y con mayor punto de ablandamiento generan menor susceptibilidad al ahuellamiento en ensayos tipo “Wheel Tracking”. Esto adquiere especial importancia si se tiene en cuenta que el asfalto utilizado en esta investigación es de penetración 80-100.

Otro aspecto importante para evaluar en el comportamiento de las mezclas envejecidas en cámara UV, corresponde a la velocidad a la deformación plástica, medida en los intervalos de 30 a 45 minutos, 75 a 90 minutos y 105 a 120 minutos de acuerdo con la norma INV E 756-07. En la Figura 5-2 se presenta la evolución en la disminución del ahuellamiento en la medida que se aumenta el tiempo de envejecimiento de las muestras

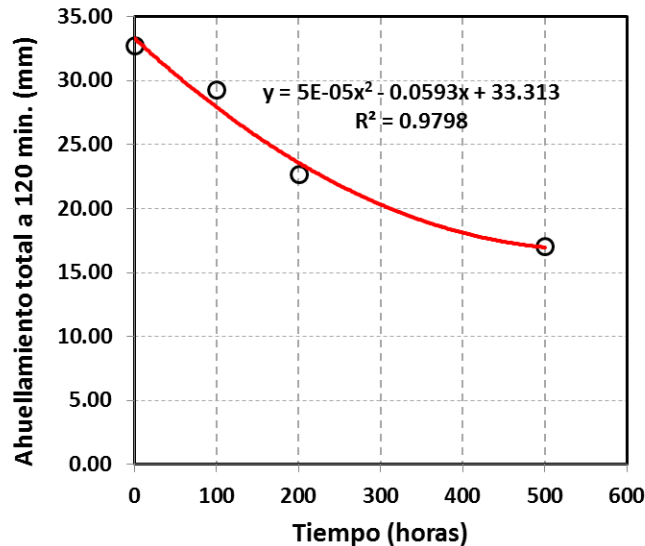


Figura 5-2 Evolución del ahuellamiento con el tiempo de envejecimiento muestras de laboratorio

Este parámetro es de gran importancia para la caracterización de las mezclas asfáltica desde el punto de vista de su deformabilidad. En la Tabla 5-1 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5-1 Resultados velocidad de deformación plástica de las muestras MDC-2 envejecidas en laboratorio

| Intervalo | Velocidad de deformación (mm/min) | | | |
|----------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | Original | 100 horas | 200 horas | 500 horas |
| V _{30/45} | 0.30 | 0.27 | 0.20 | 0.13 |
| V _{75/90} | 0.24 | 0.23 | 0.21 | 0.13 |
| V _{105/120} | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 |

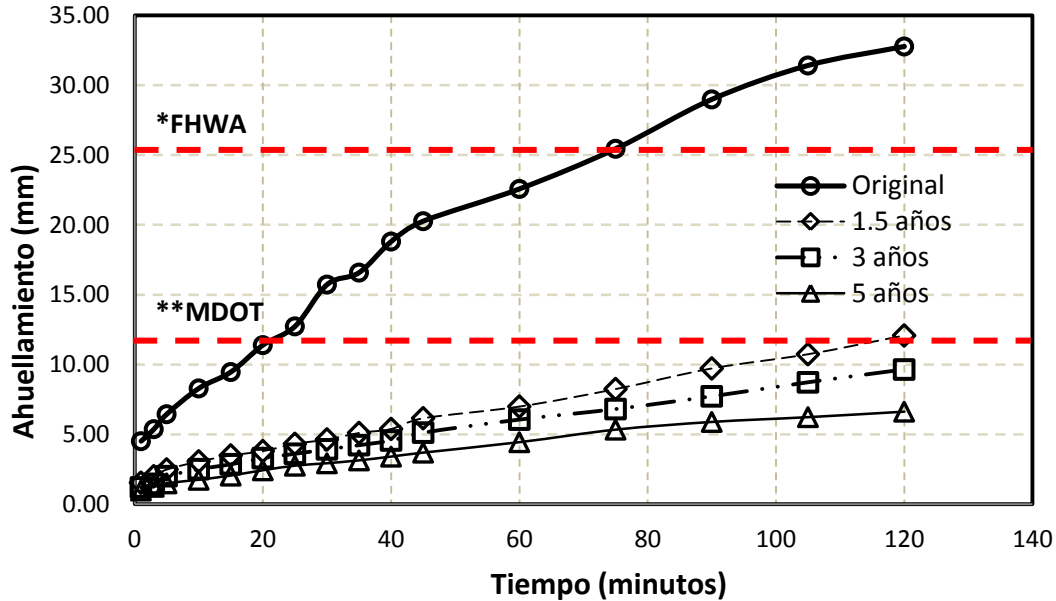
Como se observa en la tabla anterior, en la medida que aumenta el tiempo de exposición en la cámara UV disminuye de manera importante la velocidad de deformación para los intervalos iniciales del ensayo. Sin embargo, para el último intervalo de velocidad (V_{105/120}), prácticamente no se evidencia variabilidad en la velocidades de deformación de las muestras y todas se encuentran con valores de entre 0.09 y 0.08 mm/min. Este es un comportamiento típico de un proceso de ahuellamiento que evidencia las dos etapas, donde la primera tiene una velocidad mayor por efecto de la acomodamiento del material y otra de velocidad casi constante por efecto de la estabilización de la mezcla y los pocos cambios de volumen (Morea, 2011)

Llama la atención que los valores del último intervalo de velocidad, son superiores a los aceptados (0.015 y 0.02 mm/min) por la especificación IDU-510-05. Este es un tema que requiere de mayor investigación por cuanto estos depende de variables que van desde el diseño de la mezcla hasta el modo de compactación de las probetas fábricas en el laboratorio. Es importante aclarar que esta

investigación empleó el diseño Marshall de una mezcla típicamente utilizada por las empresas constructoras de infraestructura vial en la ciudad de Bogotá.

5.1.2 Resultados de los ensayos de deformación permanente para la muestras obtenidas en campo

En la Figura 5-3 se presenta la tendencia obtenida de ahuellamiento vs tiempo, para las muestras envejecidas en condiciones ambientales reales. En ella se observa que el comportamiento para las diferentes edades de envejecimiento, tienden a ser lineales y sus valores finales de deformación, son muy inferiores con respecto a los obtenidos en la curva de la muestra original (no envejecida). Se observa que la reducción del ahuellamiento con respecto a la muestra original es del 63.13%, 70.56% y 79.77% para las edades de 1.5 años, 3 años, y 5 años respectivamente.



* Federal Highway Administration, MDOT, ** Michigan Department of Transportation

Figura 5-3 Progreso de la deformación permanente muestras MDC-2 envejecidas en campo

Una tendencia similar de este comportamiento de resistencia al ahuellamiento, se evidencia en otras investigaciones locales como los resultados obtenidos por Rondón y Reyes (2012) donde reportan, una reducción del ahuellamiento entre tiempos de envejecimiento $t(0)$ y $t(5 \text{ años})$ del 77.5%, para el mismo tipo de mezcla.

En la Figura 5-4 se muestra la evolución del ahuellamiento con respecto al tiempo de envejecimiento. Este comportamiento de disminución del ahuellamiento con el paso del tiempo de envejecimiento in situ, es coherente con el observado en las muestras envejecidas en cámara UV y corresponde al proceso de oxidación del asfalto donde se aumenta la porción de asfaltenos a los cuales se les atribuye propiedades de resistencia y dureza (Afanasjeva et al., 2002).

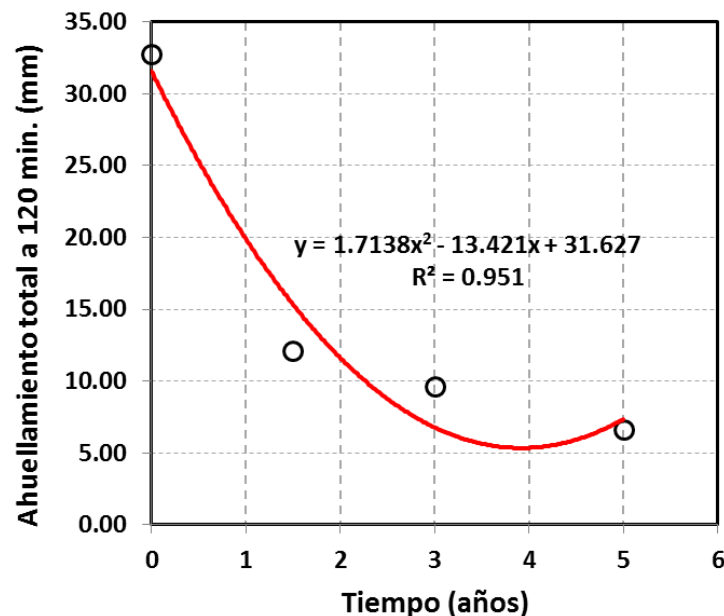


Figura 5-4 Evolución del ahuellamiento con el tiempo de envejecimiento muestras de campo

Respecto a la variación de la velocidad de deformación plástica medida en los intervalos solicitados por la Norma INV E-756 07 en la Tabla 5-2 se presentan los valores obtenidos para cada una de las edades de envejecimiento y su

comparación respecto a la muestra original.

Tabla 5-2 Resultados de la velocidad de deformación plástica para las muestras MDC-2 de campo envejecidas en condiciones reales.

| Intervalo | Velocidad de deformación (mm/min) | | | |
|---------------|-----------------------------------|----------|--------|--------|
| | Original | 1.5 años | 3 años | 5 años |
| $V_{30/45}$ | 0.30 | 0.10 | 0.08 | 0.05 |
| $V_{75/90}$ | 0.24 | 0.10 | 0.06 | 0.04 |
| $V_{105/120}$ | 0.09 | 0.09 | 0.06 | 0.03 |

En la tabla anterior, se observa una variación importante en las velocidades de deformación plástica de la muestra original con respecto a las muestras tomadas de campo para cada una de las edades de envejecimiento. Sin embargo, en el último intervalo de velocidad ($V_{105/120}$), se observa que la diferencia entre las muestras disminuye claramente con respecto a la muestra original. Lo anterior sugiere que el proceso de densificación de la mezcla combinado con el aumento de la rigidez producida por el envejecimiento, disminuyen la velocidad de deformación plástica de las mezclas asfálticas.

Es importante resaltar que al igual que las muestras envejecidas artificialmente en cámara UV, las muestras de campo tuvieron velocidades superiores a 0.02mm/min que corresponde al valor máximo solicitado para mezclas instaladas en temperaturas inferiores a 24°.

5.1.3 Comparación entre las muestras de campo y las muestras envejecidas en laboratorio

Conocidos los resultados de ahuellamiento para todas las muestras se elaboró una gráfica que presenta los comportamientos de cada una de ellas y la posible

relación que se pudiese establecer. En la Figura 5-5 se presenta la comparación de las muestras.

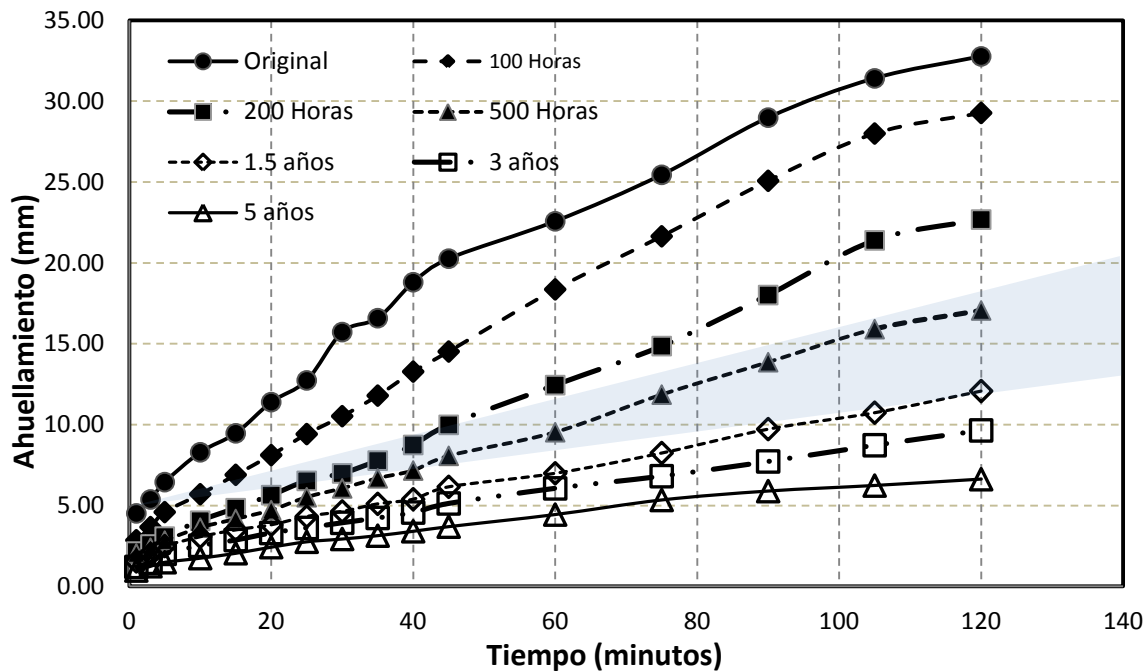


Figura 5-5 Comparación de comportamientos a la deformación permanente muestras MDC-2 campo y laboratorio

En la figura anterior, se observa que existe un distanciamiento importante de la deformación total a los 120 minutos, entre las muestras envejecidas en laboratorio y las muestras tomadas de campo en condiciones ambientales reales. Sin embargo, se observa que la brecha de este distanciamiento, se va reduciendo entre las muestras de 500 horas de UV laboratorio y 1.5 años campo (sombreado en la figura).

La hipótesis inicial para el desarrollo de esta investigación, consistió en que los tiempos seleccionados de envejecimiento acelerado en laboratorio, podrían llegar a ser correlacionados con las edades de las muestras seleccionadas en campo. Sin embargo, como se evidencia en los anteriores resultados no se alcanzaron a

traslapar estas curvas y el acercamiento entre 1.5 años sitio con 500 horas de cámara UV, induce a considerar que para lograr encontrar una relación entre dichas muestras, es necesario realizar ensayos de ahuellamiento para muestras de campo, con edades comprendidas entre 6 meses y 1.5 años de instalación.

En lo que respecta al comportamiento de la velocidad de deformación plástica, en la Tabla 5-3 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5-3 Comparación de la velocidad de deformación plástica entre muestras MDC-2 envejecidas en condiciones reales en campo y en cámara UV en laboratorio

| Intervalo | Velocidad de deformación (mm/min) | | | | | | |
|----------------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-------------|-------------|--------|--------|
| | Original | 100 horas | 200 horas | 500 horas | 1.5 años | 3 años | 5 años |
| V _{30/45} | 0.30 | 0.27 | 0.20 | 0.13 | 0.10 | 0.08 | 0.05 |
| V _{75/90} | 0.24 | 0.23 | 0.21 | 0.13 | 0.10 | 0.06 | 0.04 |
| V _{105/120} | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | 0.06 | 0.03 |

El primer análisis que soporta la anterior tabla, tiene que ver con el acercamiento en los valores obtenidos para cada uno de los intervalos de velocidad, entre la muestra de laboratorio a 500 horas y la muestra de campo a 1.5 años. Lo anterior corrobora que aunque existe un acercamiento en el desempeño a ahuellamiento entre estas dos muestras, es necesario densificar los resultados, realizando ensayos a muestras de campo con edades inferiores a 1.5 años.

Respecto a los valores superiores de velocidad admisible en el intervalo V_{105/120}, como se ha mencionado anteriormente ninguno es igual o inferior de 0.02 mm/min en desacuerdo con lo solicitado para temperaturas inferiores a 24°, siendo claro que no es un comportamiento exclusivo de las mezclas fabricadas en laboratorio. Este comportamiento es explicable, teniendo en cuenta las investigaciones que demuestran que las mezclas diseñadas por el método Marshall experimentan menor resistencia a la deformación permanente que las diseñadas por el método

SUPERPAVE (Khan & Kamal, 2008), (Swani et al, 2004) y la baja compatibilidad que existe entre los asfaltos de alta penetración con la resistencia a la deformación reportada en otras investigaciones (Sivapatham & Beckedahl, 2006) .

5.2 COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE LA MUESTRAS ENSAYADAS

Al igual que los ensayos de deformación permanente, se realizaron ensayos de resistencia a la fatiga para las muestras fabricadas y envejecidas con cámara UV en laboratorio y las muestras tomadas y envejecidas en condiciones reales de campo. A continuación se presentan los resultados de los ensayos de manera independiente y posteriormente se realizará comparación de los comportamientos en cada una de las muestras.

5.2.1 Resultados de los ensayos de fatiga para las muestras envejecidas con cámara UV en laboratorio.

De acuerdo con la metodología seleccionada para esta investigación, se realizaron ensayos de fatiga tipo flexión simple con deformación controlada y cuyos resultados se presentan en la Figura 5-6.

En esta figura se observa como en la medida que se aumentan las horas de envejecimiento, la línea de fatiga experimenta un desplazamiento hacia la izquierda disminuyendo con esto el número de ciclos para los mismos niveles de deformación. Un comportamiento similar al encontrado en esta investigación, reportan Reyes y Camacho (2008) que atribuyen este proceso al aumento en la rigidez de la mezcla.

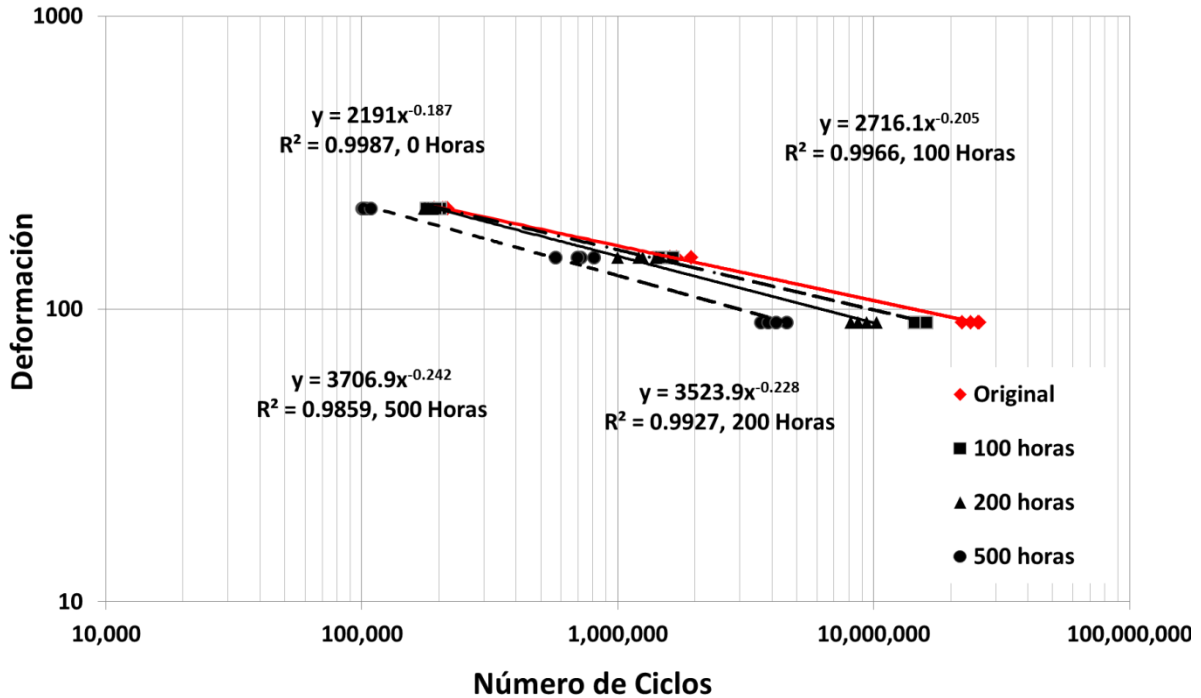


Figura 5-6 Leyes de fatiga para muestras MDC-2 envejecidas con cámara UV en laboratorio

Lo anterior representa de manera general, una disminución de la vida a la fatiga ocasionada esta, por el aumento de la rigidez de la mezcla debido a los efectos del envejecimiento acelerado que genera una condición de fragilidad en ella. En la Tabla 5-4 se observa la disminución del número de ciclos en cada una de las edades de envejecimiento.

Tabla 5-4 Comparación de la vida a fatiga de las mezclas MDC-2 envejecidas en laboratorio

| MUESTRA | Número de ciclos | | | | Amplitud (μm) |
|---------|------------------|---------------|---------------|--------------|----------------------------|
| | 0 horas | 100 horas | 200 horas | 500 horas | |
| 1 | 216,620.00 | 198,000.00 | 175,770.00 | 100,440.00 | 220 |
| | 1,601,850.00 | 1,497,380.00 | 1,253,277.90 | 716,160.00 | 150 |
| | 23,919,240.00 | 15,152,480.00 | 8,163,111.60 | 3,628,050.00 | 90 |
| 2 | 191,830.00 | 202,760.00 | 182,504.70 | 104,290.00 | 220 |
| | 1,937,400.00 | 1,519,320.00 | 1,000,074.60 | 571,470.00 | 150 |
| | 25,645,740.00 | 14,751,150.00 | 10,300,285.80 | 4,577,910.00 | 90 |
| 3 | 207,750.00 | 194,730.00 | 177,767.10 | 101,580.00 | 220 |
| | 1,701,250.00 | 1,450,410.00 | 1,214,280.90 | 693,880.00 | 150 |

| MUESTRA | Número de ciclos | | | | Amplitud (μm) |
|---------|------------------|---------------|--------------|--------------|----------------------------|
| | 0 horas | 100 horas | 200 horas | 500 horas | |
| 4 | 22,153,710.00 | 14,421,490.00 | 8,722,488.60 | 3,876,660.00 | 90 |
| | 212,390.00 | 179,130.00 | 189,485.10 | 108,280.00 | 220 |
| | 1,601,800.00 | 1,645,340.00 | 1,412,208.00 | 806,980.00 | 150 |
| | 25,914,620.00 | 16,120,730.00 | 9,381,896.61 | 4,169,730.00 | 90 |

Otro aspecto importante, corresponde a la variación de la pendiente de la línea de fatiga “b”, donde la muestra original presenta una pendiente más suave con respecto a las muestras envejecidas en los diferentes tiempos (Ver Tabla 5-5). Para el caso de la muestra envejecida a 100 horas, el aumento de su pendiente con respecto a la muestra original es del 9.63% mientras que para las 200 horas y 500 horas el aumento de la pendiente es del 21.93% y 29.41% respectivamente.

Tabla 5-5 Valores de pendiente de la línea fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras envejecidas en laboratorio.

| Envejecimiento (Horas) | Pendiente de la línea de fatiga (b) | ϵ_6 |
|------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Original | -0.187 | 165.44 |
| 100 | -0.205 | 159.94 |
| 200 | -0.228 | 151.02 |
| 500 | -0.242 | 130.92 |

En lo concerniente al valor de deformación “ ϵ_6 ” establecido para un millón de repeticiones, se observa que este decrece en la medida en que se aumenta el tiempo de exposición con respecto a la muestra original. Para el caso de la muestra de 100 horas este valor decrece en 3.33% mientras que para las 200 horas y 500 horas decrecen 8.72% y 20.87% respectivamente.

Con base en el comportamiento de los dos anteriores parámetros, se puede concluir que a mayor exposición la mezcla disminuye su resistencia a la fatiga probablemente por incremento en su rigidez, contrario a lo reportado en otras

investigaciones realizadas a esfuerzo controlado que mencionan aumento en la vida a la fatiga cuando aumenta el módulo de rigidez de la mezcla (Epps, 1969), (Elseifi et al, 2003). Esto se puede explicar teniendo en cuenta que esta investigación utilizó la metodología con deformación controlada, la cual, con el aumento de la rigidez disminuye la vida a fatiga (Rondón & Reyes, 2011), (Schmidt & Santucci, 1969)

5.2.2 Resultados de ensayos de fatiga para muestra envejecidas en condiciones reales

Para el caso de las muestras envejecidas en condiciones ambientales reales, los resultados de los ensayos de fatiga presentan comportamientos similares a los observados en las muestras con envejecimiento en laboratorio. En la Figura 5-7 se presenta las líneas de fatiga realizadas para las edades de 1.5 años, 3 años y 5 años comparados con la muestra original.

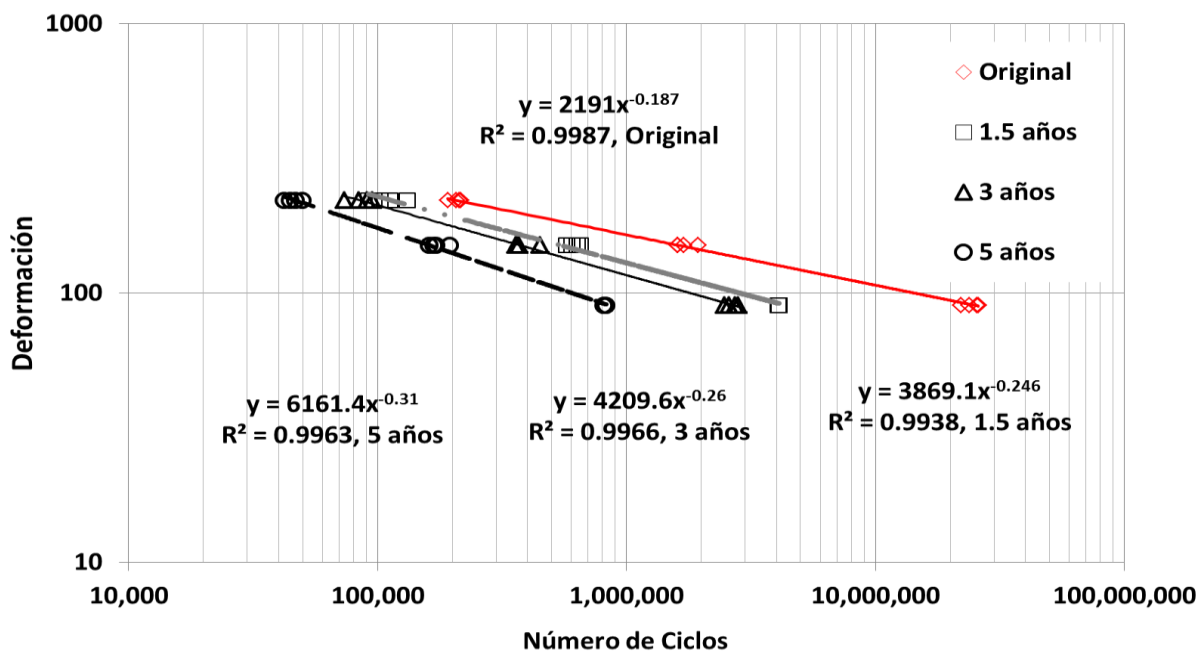


Figura 5-7. Leyes de fatiga de muestras MDC-2 envejecidas en condiciones ambientales reales

En la figura anterior presenta un comportamiento similar al evidenciado en las muestras de laboratorio. Se observa que en la medida en que se aumenta el envejecimiento de las muestras, las líneas de fatiga se desplaza de manera significativa hacia la izquierda del gráfico disminuyendo así, el número de ciclos y por consiguiente su resistencia a la fatiga, como se presenta en la Tabla 5-6.

Tabla 5-6 Comparación de la vida a fatiga de las mezclas MDC-2 envejecidas en sitio

| MUESTRA | Número de ciclos | | | | Amplitud (μm) |
|---------|------------------|--------------|--------------|------------|-------------------------------|
| | Original | 1.5 años | 3 años | 5 años | |
| 1 | 216,620.00 | 112,200.00 | 95,400.00 | 49,800.00 | 220 |
| | 1,601,850.00 | 576,000.00 | 369,000.00 | 171,600.00 | 150 |
| | 23,919,240.00 | 4,095,600.00 | 2,481,600.00 | 827,400.00 | 90 |
| 2 | 191,830.00 | 102,000.00 | 84,000.00 | 42,000.00 | 220 |
| | 1,937,400.00 | 632,400.00 | 448,800.00 | 168,000.00 | 150 |
| | 25,645,740.00 | 4,056,000.00 | 2,724,000.00 | 813,000.00 | 90 |
| 3 | 207,750.00 | 131,400.00 | 90,600.00 | 44,400.00 | 220 |
| | 1,701,250.00 | 602,400.00 | 364,800.00 | 195,000.00 | 150 |
| | 22,153,710.00 | 4,098,600.00 | 2,818,800.00 | 811,200.00 | 90 |
| 4 | 212,390.00 | 92,400.00 | 73,800.00 | 46,800.00 | 220 |
| | 1,601,800.00 | 652,800.00 | 361,200.00 | 160,800.00 | 150 |
| | 25,914,620.00 | 4,085,400.00 | 2,580,000.00 | 817,800.00 | 90 |

Comparando los comportamientos de las tres edades de envejecimiento, se puede observar que la pendiente de línea de cada ley de fatiga aumenta en la medida en que su exposición a las condiciones ambientales reales es mayor. Es así como, se presentan aumentos de pendiente del 31.55%, 39.04% y 65.78% para las edades de 1.5 años, 3 años y 5 años respectivamente con respecto a la muestra original

(Ver Tabla 5-7). Este comportamiento ratifica el aumento de la fragilidad de las muestras en la medida en que aumentan su exposición a las condiciones ambientales reales.

Tabla 5-7 Valores de línea de pendiente de fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras de campo

| Envejecimiento (años) | Pendiente de la línea de fatiga (b) | ϵ_6 |
|----------------------------------|--|--------------------------------|
| Original | -0.187 | 165.44 |
| 1.5 | -0.246 | 124.05 |
| 3 | -0.26 | 115.94 |
| 5 | -0.31 | 85.05 |

En la tabla anterior se observa también como el valor de deformación para un millón de repeticiones “ ϵ_6 ”, disminuye de manera importante con respecto a la muestra original sin envejecer hasta en un 48.59% para la muestra de cinco años y 21.84% y 29.92% para las edades de 1.5 años y tres años respectivamente.

5.2.3 Comparación entre las muestras de campo y las muestras envejecidas en laboratorio

Una vez conocidos los resultados de fatiga para cada una de las diferentes edades de envejecimiento, se elaboró una gráfica que permitiese encontrar una relación de las muestras obtenidas en campo con respecto a las muestras preparadas en laboratorio. En la Figura 5-8 se presentan las comparaciones de dichos resultados.

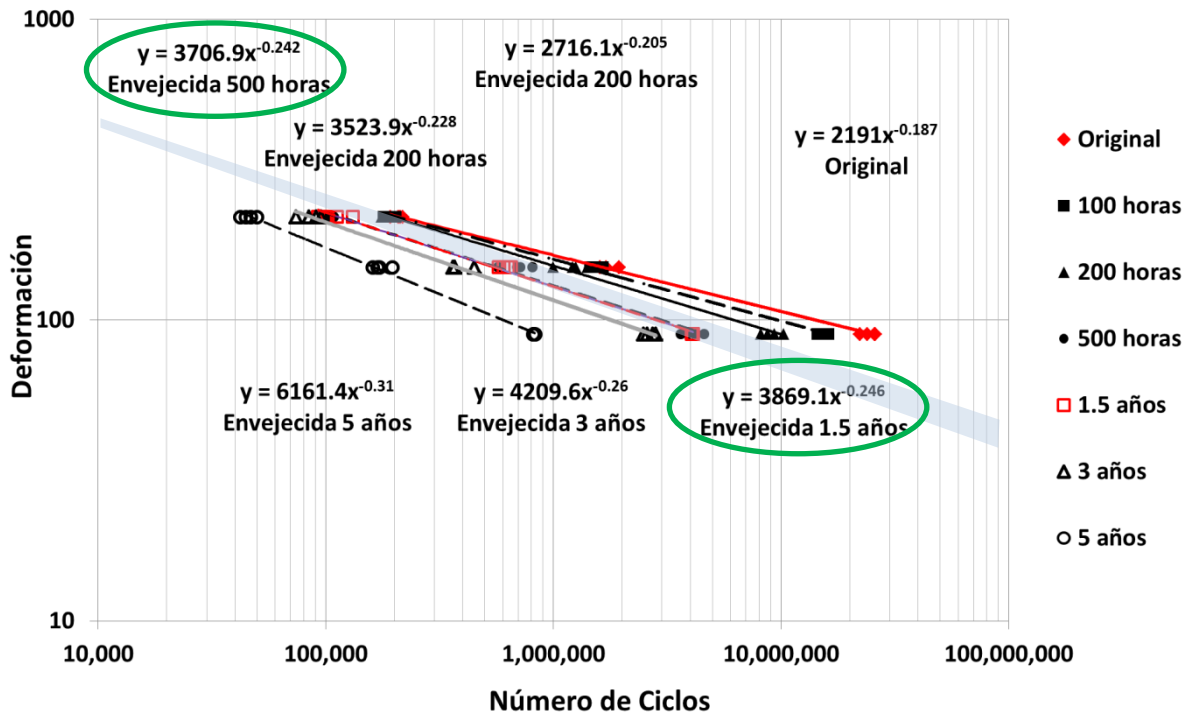


Figura 5-8 Comparación de comportamientos a la fatiga de las muestras MDC-2 campo y laboratorio

La primera situación importante que se puede observar en la figura anterior, corresponde a la similitud que existe entre las líneas de fatiga de 500 horas de envejecimiento artificial en cámara UV, y 1.5 años envejecida en condiciones reales (Sombreado en la figura). Con este comportamiento se establece una relación directa de envejecimientos, que permite cumplir con gran parte de los objetivos planteados al inicio de esta investigación. Sin embargo, dado que la edad más corta de las muestras de campo ensayadas es precisamente los 1.5 años, se evidencia la necesidad de ensayar muestras de campo con edades inferiores, de tal manera que se encuentren una mayor cantidad de puntos comunes que permitan obtener una curva de relación entre muestras.

Una situación similar se evidencia en los valores de la pendiente de la línea de fatiga “b” donde se observa la misma similitud anterior entre dichas muestras. Ver

Tabla 5-8.

Tabla 5-8 Valores obtenidos de la línea de pendiente de fatiga y deformación en un millón de repeticiones para muestras MDC-2 campo y laboratorio

| Envejecimiento | Pendiente de la línea fatiga (b) | ϵ_6 |
|-----------------------|---|--------------------------------|
| Original | -0.187 | 165.44 |
| 100 horas | -0.205 | 159.94 |
| 200 horas | -0.228 | 151.02 |
| 500 horas | -0.242 | 130.92 |
| 1.5 años | -0.246 | 129.30 |
| 3 años | -0.26 | 115.94 |
| 5 años | -0.31 | 85.05 |

Con respecto al valor de la deformación para un millón de repeticiones “ ϵ_6 ”, se observa el mismo acercamiento entre los envejecimientos de 500 horas laboratorio y 1.5 años campo y el decaimiento de la vida a fatiga, en la medida en que las muestras aumentan los tiempos de exposición.

6. CONCLUSIONES

El envejecimiento que experimentan las mezclas asfálticas producto de la radiación ultravioleta – UV, reduce significativamente el desempeño a fatiga de estas mezclas en servicio en la ciudad de Bogotá, debido a que el material va cambiando su comportamiento de dúctil a frágil con el aumento del tiempo de exposición. Ante esto, se presume un aumento en la rigidez de la mezcla que se concluye, a partir del incremento de la pendiente de la línea de fatiga “b” y la disminución de la deformación para un millón de repeticiones “ ϵ_6 ”. Este comportamiento fue común tanto para las mezclas envejecidas en laboratorio como las tomadas in situ.

Con base en los resultados de comportamientos a fatiga entre las muestras de campo y de laboratorio, se puede concluir que 500 horas de cámara UV, corresponden a 1.5 años de envejecimiento en campo, dada la similitud de las líneas de fatiga y su pendiente entre estas dos muestras. Sin embargo, esta situación no fue igual para el ahuellamiento, donde se evidenció una amplitud mayor en el rango entre estos mismos períodos evaluados.

Para el caso de las muestras ensayadas para ahuellamiento, a diferencia de las de fatiga, el envejecimiento producto de la radiación ultravioleta – UV, causa un aumento en la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento). Situación está, que se evidenció en los resultados de la investigación tanto para las muestras envejecidas en laboratorio como para las muestras tomadas in situ. Lo anterior induce a concluir la necesidad de establecer un equilibrio en el cual se

mejore desempeño de la mezcla frente a estos dos mecanismos de daño.

Las velocidades de deformación que se presentaron en las muestras de campo y laboratorio, fueron superiores a los 20 micrones/minutos mínimos que establece la especificación técnica para Bogotá (IDU-510). Lo anterior sugiere revisar dos aspectos importantes: El primero corresponde a la metodología de diseño de las mezclas asfálticas de Colombia, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en esta investigación, y las realizadas por distintos autores que reportan diferencias considerables entre los métodos de compactación Marshall y SUPERPAVE. El segundo aspecto corresponde al uso de asfaltos de alta penetración (80-100) dada su baja compatibilidad con la resistencia a la deformación permanente. Lo anterior basado en investigaciones realizadas por diferentes autores citadas en este documento.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la comparación de los comportamientos a fatiga y ahuellamiento entre las muestras fabricadas y envejecidas en laboratorio con las muestras extraídas de campo, se considera que el empleo de la cámara UV simula una buena aproximación respecto a lo que sucede en campo. Lo anterior se evidencia en la similitud de las tendencias de dichos comportamientos aun cuando es necesario mejorar los tiempos de exposición en dicha cámara.

7. BIBLIOGRAFIA

- Afanasjeva, N., Alvarez, M., & Ortiz, M. J. (2002). RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF AGED ASPHALT. *C T & F - Ciencia Tecnología y Futuro*, 2(3), 121 - 134.
- Arenas, H. L. (2009). *Propuesta Técnica para Garantizar la Homogeneidad de los Asfaltos Producidos en las Refinerías Colombianas*. Cámara Colombiana de Infraestructura.
- Bell, C. . (1989). Aging of Asphalt-Aggregate Systems. SHRP A-305. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- Bell, C. ., AdWahab, Y., & Cristi, M. . (1991). INVESTIGATION OF LABORATORY AGING PROCEDURES FOR ASPHALT-AGGREGATE MIXTURES. *Transport Research International Documentation - TRID*, 32-46.
- Bocci, M., & Cemi, G. (2000). The ultraviolet radiation in short-and long-term aging of bitumen. En *Book 1 - Session 1*. Barcelona - Spain.
- Caicedo, B., & Martínez, G. (2005). Efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento de ligantes y mezclas asfálticas. *Universidad de los Andes*, 14.

- Chávez, V. L. E., & Hernández, B. C. (2009). Estado del Arte y Perspectiva del Envejecimiento de los Pavimentos Asfáltico. *Redalyc*, 19(1), 30 - 39.
- Eidler, A. C., Hattingh, M. M., Servas, V. P., & Marais, C. P. (1985). Use of Aging Tests to Determine the Efficacy of Hydrated Lime Additions to Asphalt in Retarding its Oxidative Hardening. *Proc. Association Asphalt Paving Technologists*, 54, 118-139.
- Elseifi, M. ., Flintsch, G. ., & Al-Qadi, I. . (2003). Quantitative Effect of Elastomeric Modification on Binder Performance at Intermediate and High Temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(1), 32-40.
- Epps, J. . (1969). *Influence of Mixture Variables on The Flexural Fatigue and Tensile Properties of Asphalt Concrete*. (Ph. D. Thesis). University of California, Berkeley.
- Fernández, G. W. D., Rondón, Q. H. A., & Reyes, L. F. A. (2013). The effects of environmental aging on Colombian asphalts. *Elsevier - Fuel*, (115), 321-328.
- Garnica, A. P., Gómez, L. J. A., & Sesma, M. J. A. (2002). Mecánica de Materiales para Pavimentos. *Instituto Mexicano del Transporte*, (197), 117-171.
- Gómez, M. G. (2012, junio 12). Bogotá sólo cuenta con el 20% de presupuesto para mantenimiento de la malla vial.
- Hagos, E. T. (2008). The effect of aging on binder properties of porous asphalt concrete. *Delfi University of Technology, the Netherlands*.
- IDU. (2012). Evolución del Inventario de la malla vial 2004 - 2012.
- INVIAS. (2007). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras.

- Ministerio de Transporte, Instituto Nacional de Vías, Subdirección de Apoyo Técnico.
- Khan, K. M., & Kamal, M. A. (2008). Impact of Superpave Mix Design Method on Rutting Behavior of Flexible Pavements in Pakistan. *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 33(2B), 379-390.
- Kliwer, J. E. (1995). Investigation of relationship between field performance and laboratory aging properties of asphalt mixtures. *Engineering properties of asphalt mixtures and relationship to their performance*, 3-20.
- Lopes, M. M., Zhao, D., Chailleux, E., Kane, M., Gabet, T., & Petiteau, C. (2012). Characterization of Aging Processes on the Asphalt Mixture Surface (pp. 1-10). Presentado en 2nd International Symposium on, Asphalt Pavements et Environnement, Transportation Research Board, of The National Academies, France: ISAP.
- Ministerio de Minas y Energía, C. (2005). *Atlas de Radiación Solar de Colombia* (Tecnico Institucional) (pp. 157 - 167). Ministerio de Minas y Energia de Colombia.
- Montepara, A., & Giuliani, F. (2000). Comparison between ageing simulation tests of road bitumen. En *Performance Testing and Specification for Binder and Mixtures* (pp. 518 - 523). Barcelona - Spain.
- Montepara, A., Sangata, E., & Tosi, G. (1996). Photochemical degradation of pure bitumen by UV radiation. *Euroasphalt & Eurobitumen Stasbourg*, (5), 133.
- Morea, F. (2011, septiembre 6). *Deformaciones Permanentes en Mezclas*

- Asfálticas, Efectos de la Reología de los Asfaltos, las Temperatura y las Condiciones de Carga* (Tesis Para Doctorado). Universidad de La Plata, La Plata, Argentina.
- Parada, C. M. L., Caicedo, B., & Lepesqueur, M. A. J. (2005). Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación. *Universidad de los Andes*.
- Puello, M. J., & Afanasjeva, N. N. (2009, diciembre). técnicas instrumentales para la evaluación del envejecimiento en los asfaltos. *ITECKNE*, 6(2), 18-28.
- Reyes, F. A., Daza, C. E., & Rondón, H. A. (2012, julio). DETERMINATION OF SARA FRACTIONS OF ENVIRONMENTALLY AGED COLOMBIAN ASPHALTS USING LIQUID CHROMATOGRAPHY COLUMN. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, (17), 47-56.
- Reyes, O. O. J., & Camacho, T. J. F. (2008). Efecto de la radiación ultravioleta en las propiedades mecánicas y dinámicas de una mezcla asfáltica. *REVISTA INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, 28(3), 22-27.
- Rodriguez, R. M. (2000). A Model for Fatigue Cracking Prediction of Asphalt Pavements Based on Mixture Bonding Energy. *International Journal of Pavement Engineering*, 1(2), 133-149.
- Rondón, H. A., & Reyes, L. F. A. (2009). Influencia de las condiciones ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el comportamiento mecánicos de una mezcla asfáltica. *Revista Ingeniería de Construcción*, 24(2), 195 - 207.
- Rondón, Q. H. A., & Reyes, L. F. A. (2009). Deformación Permanente de

- Materiales Granulares en Pavimentos Flexibles: Estado del Conocimiento.
Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 8(14), 71-94.
- Rondón, Q. H. A., & Reyes, L. F. A. (2011). *Pavimentos flexibles. Definiciones, conceptos y diseño* (1.^a ed.). Alemania: Editorial Académica Española.
- Rondón, Q. H. A., & Reyes, L. F. A. (2012). *Envejecimiento de Mezcla Asfáltica en Condiciones Ambientales Reales. Caso de Estudio Bogotá D.C.* Editorial Académica Española.
- Schmidt, R. J., & Santucci, L. . (1969). The Effect of Asphalt Properties on the Fatigue Cracking of Asphalt Concrete on the Zaca-Wigmore Test Project. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, 38, 39-64.
- Sivapatham, P., & Beckedahl, H. J. (2006). Influence of the Compaction Degree of Asphalt on Rutting and Stiffness Comparison between Conventional and Innovative Asphalts. En *Airfield and Highway Pavement: Meeting Today's Challenges with Emerging Technologies* (pp. 486 - 497). Atlanta, Georgia, United States: American Society of Civil Engineers.
- Swani, B. ., Mehta, Y. ., & Bose, S. (2004, septiembre). A Comparison of the Marshall and Superpave Design Procedure for Materials Sourced in India. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(3), 163-173.
- Tarefder, R. A., Zaman, M., & Hobson, K. (2003). A Laboratory and Statistical Evaluation of Factors Affecting Rutting. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(1), 59-68.
- Traxler, R. (1963). Durability of Asphalt Cements. *Proceedings, Association of*

Asphalt Paving Technologists, 32, 44 - 58.

Vallerga, B. ., Monismith, C. L., & Granthem, K. (1957). A Study of Some Factors Influencing the Weathering of Paving Asphalts. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*,, 26, 126 - 150.

Vera, S. J. (2012, abril). *Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión*. Pontificia Universidad Javeriana, Grupo Investigador CECATA, Bogotá.

Wang, J., Pang, L., Wu, S., Liu, Q., & Chen, Z. (2008, septiembre 1). Effect of ageing on fatigue properties of asphalt. *Journal of Central South University of Technology*, 15(1), 111-114.