

**“COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO ENTRE MEZCLAS  
ASFÁLTICAS MDC-2 ENVEJECIDAS EN LABORATORIO Y  
MEZCLAS EN SERVICIO EN BOGOTÁ”**



**PRESENTADO POR:  
ALBA CRISTINA VIDES BERDUGO**

**DIRECTOR:  
FREDY ALBERTO REYES LIZCANO**

**CO-DIRECTOR:  
WILMAR DARÍO FERNÁNDEZ GÓMEZ**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., OCTUBRE DE 2013.**

## **APROBACIÓN**

El Trabajo de grado con título: “Comparación del Desempeño entre mezclas asfálticas MDC-2 envejecidas en laboratorio y mezclas en servicio en Bogotá”, desarrollado por la estudiante: Alba Cristina Vides Berdugo, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

---

**Fredy Alberto Reyes Lizcano**  
Director

---

**Hugo Alexander Rondón Quintana**  
Jurado 1

---

**Oscar Javier Reyes Ortiz**  
Jurado 2

## **COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO ENTRE MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC-2 ENVEJECIDAS EN LABORATORIO Y MEZCLAS EN SERVICIO EN BOGOTÁ**

**Alba Cristina Vides Berdugo**

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.



## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de grado a mis padres y hermanos, personas importantes y que hacen parte de mi proyecto de vida y con las que sigo compartiendo los grandes retos que existen en ella.

## **AGRADECIMIENTOS**

A los Ingenieros Fredy Alberto Reyes Lizcano y Wilmar Darío Fernández Gómez, por su orientación, dedicación y aportes en el desarrollo de este proyecto.

A mis padres y mis hermanos que siempre me han apoyado en las decisiones más importantes de mi vida.

Al personal de laboratorio de la universidad por su atención y orientación en los ensayos realizados.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>2. PROBLEMA .....</b>	<b>17</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>18</b>
<b>4. OBJETIVOS.....</b>	<b>19</b>
4.1. OBJETIVO GENERAL .....	19
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>5. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>20</b>
5.1. MARCO CONCEPTUAL .....	20
5.1.1. Mezcla Asfáltica.....	20
5.1.2. Desempeño Mecánico de las Mezclas Asfálticas .....	22
5.1.2.1. Ensayo de Ahuellamiento.....	23
5.1.2.2. Ensayo de Fatiga.....	24
5.1.3. Envejecimiento del Asfalto por medio del equipo P.A.V. ....	27
5.2. MARCO DE ANTECEDENTES .....	29
5.2.1. Envejecimiento de Asfalto utilizando la cámara de presión PAV (Pressure Aging Vessel).....	29
5.2.2. Investigaciones relacionadas con Ensayos de Ahuellamiento.....	40
5.2.3. Investigaciones relacionadas con Ensayos de Fatiga Trapezoidal .....	42
<b>6. METODOLOGÍA.....</b>	<b>44</b>
6.1. EXTRACCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO MDC-2 EN SERVICIO.....	45
6.2. OBTENER MUESTRAS EN LABORATORIO CON BASE EN DISEÑOS DE MEZCLA DE LA FIRMA CONCRESCOL S.A., PARA ENVEJECERLAS ACELERADAMENTE POR MEDIO DEL PAV .....	47
6.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AHUELLAMIENTO (NORMA INVE-756) .....	53

6.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE FATIGA (NORMA FRANCESA NFP-98-261).....	54
6.5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MEZCLAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE Y ACELERADAS EN LABORATORIO CON EL FIN DE OBTENER LA CURVA MAESTRA DE AHUELLAMIENTO Y FATIGA. ....	55
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>56</b>
7.1. AHUELLAMIENTO.....	57
7.1.1. <i>Mezclas Envejecidas por medio del Equipo PAV.</i> .....	57
7.1.2. <i>Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio.</i> .....	60
7.2. FATIGA TRAPEZOIDAL .....	63
7.2.1. <i>Mezcla Asfáltica a 0 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.</i> .....	65
7.2.2. <i>Mezcla asfáltica a 20 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.</i> .....	66
7.2.3. <i>Mezcla asfáltica a 50 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.</i> .....	67
7.2.4. <i>Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio. Calle 153.</i> 69	
7.2.5. <i>Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio. Cicloruta sobre la Carrea 11.</i> .....	70
<b>8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>72</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>86</b>
<b>10. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>88</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DEFORMACIÓN PERMANENTE POR FALLO EN LA MEZCLA ASFÁLTICA.....	23
FIGURA 2. CURVA TÍPICA DE FLUJO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA. ....	24
FIGURA 3. PROBETA TRAPEZOIDAL .....	25
FIGURA 4. ETAPAS EN EL PROCESO DE ENVEJECIMIENTO .....	28
FIGURA 5. CAMBIO DE LA VISCOSIDAD DEBIDO A LA OXIDACIÓN EN PAV, DE DOS ASFALTOS DIFERENTES .....	31
FIGURA 6. EVOLUCIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE LA ESTABILIDAD Y EL FLUJO (RIGIDEZ MARSHALL) CON EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO PARA MEZCLAS ELABORADAS CON CA 80-100 Y CA 60-70. ....	33
FIGURA 7. RELACIÓN E/F (RIGIDEZ MARSHALL) CON EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO, PARA MEZCLAS FABRICADAS CON CA 80-100, CA 60-70 Y CAM 20-40. ....	34
FIGURA 8. EVOLUCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE CON EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO PARA MEZCLAS FABRICADAS CON CA 60-70. ....	35
FIGURA 9. EVOLUCIÓN DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL PERMANENTE CON EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO PARA MEZCLAS FABRICADAS CON CA 80-100, CA 60-70 Y CAM 20-40. ....	35
FIGURA 10. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE A LOS 3 AÑOS.....	37
FIGURA 11. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE A LOS 5 AÑOS.....	37
FIGURA 12. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE A LOS 7 AÑOS.....	37

FIGURA 13. ESTIMACIÓN DE LA VISCOSIDAD Y SU VARIACIÓN SEGÚN LA PROFUNDIDAD Y EL TIEMPO DE SERVICIO. EL $G^*$ SE TOMA A UNA $T=52^{\circ}\text{C}$ .	38
FIGURA 14. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE EN CONDICIÓN DE TEMPERATURA: $90^{\circ}\text{C}$ , PRESIÓN= 210 PSI, TIEMPO: 20 HORAS.	39
FIGURA 15. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE EN CONDICIÓN DE TEMPERATURA: $110^{\circ}\text{C}$ , PRESIÓN= 100 PSI, TIEMPO: 20 HORAS.	39
FIGURA 16. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE EN CONDICIÓN DE TEMPERATURA: $110^{\circ}\text{C}$ , PRESIÓN= 210 PSI, TIEMPO: 15 HORAS.	39
FIGURA 17. PROPIEDADES REOLÓGICAS MEZCLAS ASFÁLTICAS ENVEJECIDAS ACELERADAMENTE EN CONDICIÓN DE TEMPERATURA: $100^{\circ}\text{C}$ , PRESIÓN= 210 PSI, TIEMPO: 20 HORAS.	39
FIGURA 18. 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.	40
FIGURA 19. EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS DE ASFALTO EN DEFORMACIÓN VERTICAL.	41
FIGURA 20. EFECTO DEL ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS DE ASFALTO EN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.	42
FIGURA 21. EVOLUCIÓN DE A) $E_{MAX}$ Y B) $E_{MAX}/\Sigma$ CON E. RESULTADOS OBTENIDOS PARA 360 MUESTRAS.	43
FIGURA 22. DIAGRAMA DE FLUJO.	44
FIGURA 23. MUESTRAS EXTRAÍDAS EN SERVICIO PARA ENSAYOS DE AHUELLAMIENTO.	46

FIGURA 24. DELIMITACIÓN DE LAS PANELAS PARA ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL. ....	47
FIGURA 25. HUSO GRANULOMÉTRICO DE AGREGADOS PÉTREOS PARA MEZCLAS TIPO MDC-2.....	48
FIGURA 26. TAMIZADO Y PREPARACIÓN DE AGREGADO PÉTREO.....	48
FIGURA 27. SELECCIÓN DE TEMPERATURA PARA EL ENSAYO DE PAV..	50
FIGURA 28. DISPOSICIÓN DEL ASFALTO EN LAS BANDEJAS DEL PAV. ...	50
FIGURA 29. EQUIPO DE PAV EMPLEADO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.....	51
FIGURA 30. PRESIÓN PARA ENVEJECIMIENTO A LARGO PLAZO EMPLEANDO EL EQUIPO PAV.....	51
FIGURA 31. PROCEDIMIENTO PARA LE EJECUCIÓN DE ENSAYOS DE AHUELLAMIENTO Y FATIGA TRAPEZOIDAL. ....	52
FIGURA 32. EQUIPO DE AHUELLAMIENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA.....	54
FIGURA 33. EQUIPO DE FATIGA TRAPEZOIDAL DE LA PONTIFICA UNIVERSIDAD JAVERIANA.....	55
FIGURA 34. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA A 0 HORAS DE ENVEJECIMIENTO EN PAV.....	57
FIGURA 35. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA A 5 HORAS DE ENVEJECIMIENTO EN PAV.....	58
FIGURA 36. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA A 20 HORAS DE ENVEJECIMIENTO EN PAV.....	58
FIGURA 37. DESPRENDIMIENTO DEL AGREGADO PARA MUESTRA A 50 HORAS DE ENVEJECIMIENTO EN PAV. ....	59
FIGURA 38. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA A 50 HORAS DE ENVEJECIMIENTO EN PAV.....	60

FIGURA 39. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA EN SERVICIO, UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRA: CALLE 153. ....	61
FIGURA 40. ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MUESTRA DE CICLORUTA, UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRA: CARRERA 11 CON CALLE 93.....	61
FIGURA 41. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA ENVEJECIDA A 0 HORAS EN PAV. ....	66
FIGURA 42. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA ENVEJECIDA A 20 HORAS EN PAV. ....	66
FIGURA 43. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA ENVEJECIDA A 50 HORAS EN PAV. ....	67
FIGURA 44. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA FABRICADAS EN LABORATORIO. ....	68
FIGURA 45. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA EN SERVICIO, UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRA: CALLE 153. ....	69
FIGURA 46. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA DE CICLORUTA, UBICACIÓN DE TOMA DE MUESTRA: CARRERA 11 CON CALLE 93.....	70
FIGURA 47. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA EN SERVICIO.....	71
FIGURA 48. OBTENCIÓN DE CURVA MAESTRA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO Y EL AHUELLAMIENTO VERTICAL. ....	73
FIGURA 49. RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS EN LABORATORIO Y NATURALMENTE (EN SERVICIO).....	75

FIGURA 50. RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS EN PAV DE 20 Y 50 HORAS, Y MEZCLAS EXTRAÍDAS DE CAMPO. ....	76
FIGURA 51. COMPORTAMIENTO LINEAL PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS EN PAV A 0 Y 5 HORAS. ....	77
FIGURA 52. COMPORTAMIENTO POTENCIAL PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS EN PAV A 20 Y 50 HORAS, Y MEZCLAS EXTRAÍDAS EN CAMPO. ....	78
FIGURA 53. DESPRENDIMIENTO OBSERVADO DURANTE EL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO PARA UNA MEZCLA CON ASFALTO ENVEJECIDO A 50 HORAS EN PAV. ....	79
FIGURA 54. OBTENCIÓN DE CURVA MAESTRA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO Y LA PENDIENTE DE LA LEY DE FATIGA B. ....	81
FIGURA 55. ECUACIONES DE CORRELACIONES DE LA CURVA DE FATIGA NO RECOMENDADAS. ....	82
FIGURA 56. RESULTADOS OBTENIDOS EN ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL NFP-98-261. ....	84
FIGURA 57. AJUSTE DE LA CURVA DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL NFP-98-261. ....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. FACTORES QUE AFECTAN EL AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS. ...	41
TABLA 2. ENSAYOS MÍNIMOS DE CALIDAD PARA AGREGADOS PÉTREOS DE MEZCLA ASFÁLTICA. ....	49
TABLA 3. ENSAYOS REALIZADOS SOBRE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. ....	56
TABLA 4. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO. MEZCLAS FABRICADAS EN LABORATORIO. ....	62
TABLA 5. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO. MEZCLAS EXTRAÍDAS EN CAMPO. ....	62
TABLA 6. TIEMPO DE DURACIÓN EN DÍAS HASTA LA FALLA (0, 20 Y 50 HORAS). ....	63
TABLA 7. TIEMPO DE DURACIÓN EN DÍAS HASTA LA FALLA (CALLE 153 Y CICLORUTA). .....	64
TABLA 8. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL PARA MUESTRA ENVEJECIDA A 0 HORAS EN PAV. ....	65
TABLA 9. RESUMEN DE RESULTADOS DEL ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL. ....	71
TABLA 10. RESULTADOS DE VALORES DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS EN LABORATORIO. ....	72
TABLA 11. RESULTADOS DE VALORES DE DEFORMACIÓN PERMANENTE PARA MEZCLAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE (EN SERVICIO). ....	72
TABLA 12. RELACIÓN DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL OBTENIDA DE MEZCLAS EN SERVICIO Y EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO EN PAV. ....	74
TABLA 13. RESULTADOS DE VALORES DEL ENSAYO DE FATIGA PARA MEZCLAS EVALUADAS. ....	80
TABLA 14. RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE ENVEJECIMIENTO EN PAV Y LA PENDIENTE DE LA LEY DE FATIGA $B$ . ....	83



## **ÍNDICE DE ANEXOS**

ANEXO A. RESULTADOS ENSAYO DE AHUELLAMIENTO

ANEXO B. RESULTADOS ENSAYO DE FATIGA TRAPEZOIDAL

## 1. INTRODUCCIÓN

Las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras deben conseguir determinadas características estructurales y funcionales requeridas en un pavimento flexible para garantizar su resistencia, durabilidad, confort y seguridad durante el periodo de diseño. No obstante, producto de las cargas del tráfico y las condiciones ambientales, estas se agrietan por lo que deben ser reparadas para conseguir ampliar la vida útil de los pavimentos. El periodo comprendido entre 7 y 8 años corresponde en promedio al tiempo en el cual el riesgo de daño por degradación es cercana al 15% y se requiere una recalza de pavimento (Reyes, 2003). Ahora, con el fin de concederles una mayor resistencia en su diseño, es fundamental conocer su resistencia al agrietamiento en condiciones reales.

Con esta investigación se pretende conocer la forma como se degradan los pavimentos flexibles y de esta manera obtener a partir de curvas maestras el tiempo en el cual las mezclas asfálticas presentan condiciones desfavorables para su correcta funcionalidad, y de esta manera definir con mayor certeza en las etapas de diseño de la estructura de pavimento, los tiempos de mantenimiento y/o rehabilitación de la vía.

Una de las variables principales en el diseño de las estructuras de pavimento son las propiedades mecánicas de las mezclas, como por ejemplo el módulo dinámico, el ahuellamiento y la ley de fatiga; por lo cual uno de los objetivos principales de esta investigación, consiste establecer el desempeño mecánico a fatiga y ahuellamiento de mezclas asfálticas tipo MDC-2 envejecidas naturalmente y en laboratorio.

Las mezclas asfálticas al ser típicamente diseñadas con procedimientos empíricos de laboratorio, implican que la experiencia en campo se vuelve necesaria para determinar si el análisis de laboratorio tiene correlación con el desempeño del pavimento. De cualquier manera, aún con la correcta conjunción de estos



procedimientos y el desarrollo del criterio de diseño de la mezcla, no se podían asegurar buenos grados de desempeño (Garnica, Gómez, Delgado, 2003).

Para llevar a cabo lo propuesto, el presente documento está organizado como sigue:

En el capítulo 1 se planteará el planteamiento del problema, justificación y objetivos.

En el segundo capítulo, se tratarán los diferentes estudios relacionados con el tema del envejecimiento del asfalto y el desempeño mecánico que presentan las mezclas asfálticas. Además se indican los términos más relevantes del lenguaje empleado.

En el tercer capítulo, se esboza el diseño experimental del proyecto, método de disposición de las muestras y los tiempos estipulados para probar las mismas y se tendrá la descripción de todos los materiales y metodologías a utilizar en esta investigación. Dentro de las metodologías se describen los ensayos a los cuales serán sometidas las mezclas y finalmente como se evaluarán las muestras tanto elaboradas en el laboratorio como las recuperadas en campo.

En el capítulo 4° y 5° se presentan los resultados obtenidos para cada tiempo de prueba propuesto, presentando la comparación y correlación de cada uno de los resultados obtenidos en los ensayos y se relacionan con opiniones y resultados de otros investigadores.

Por último se discutirán los datos procesados y se mostrarán las conclusiones y recomendaciones para la realización de futuras investigaciones

## 2. PROBLEMA

Tomando como base la afirmación de Ruíz y Pérez (2002), en su escrito “Influencia de los betunes en las deformaciones plásticas de las mezclas bituminosas”, donde se menciona que al tener temperaturas bajas, no existen deformaciones plásticas y el comportamiento de la mezcla es elástico; por el contrario, a temperaturas intermedias y elevadas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones generadas por el tráfico se incrementan, lo que conlleva a producir ahuellamiento en la mezcla debido a su componente viscosa. Así las cosas, la investigación se encuentra delimitada para la ciudad de Bogotá, la cual se encuentra en una zona donde se presentan condiciones ambientales predominantes de clima frío con temperaturas mínimas y máximas promedio de 6 °C y 20 °C respectivamente, humedades entre 60 y 100 % y localizada a una altura aproximada de 2650 m.

La norma INV-E 751-07, cita en su numeral 4.1 lo siguiente: “Este método está diseñado para simular el envejecimiento por oxidación que ocurre en ligantes asfálticos durante la vida de servicio del pavimento. El residuo proveniente de este ensayo puede ser usado para estimar las propiedades físicas o químicas de ligantes asfálticos entre cinco a diez años de envejecimiento en el campo” (subrayado y negrilla fuera de texto), razón por la cual es necesaria la aplicación de esta investigación para determinar las propiedades mecánicas de mezclas tipo MDC-2 que mejor representen las características en campo para un determinado periodo de servicio y de esta forma incluir dentro de los diseños los parámetros y recomendaciones más acertadas a la realidad.

Por esta razón, simulando el envejecimiento que experimentan las mezclas asfálticas a lo largo de su vida en servicio y determinando las propiedades de éstas, ¿Cuál sería la relación entre el tiempo de envejecimiento en laboratorio de mezclas asfálticas con la variación de sus propiedades mecánicas para diferentes periodos de servicio en la ciudad de Bogotá?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Existen actualmente métodos sobre el diseño de los pavimentos que se basan en determinar las tensiones y deformaciones unitarias en puntos críticos de la estructura del pavimento y relacionarlos con un número de repeticiones de carga a través de ecuaciones de transferencia que se obtienen en forma empírica (Palma, Wahr, Pérez y Estay, 2001). Los principales mecanismos de degradación que se intentan controlar en las metodologías empíricas y mecanicistas de diseño de pavimentos son la fatiga y el exceso de deformación permanente en la dirección vertical (Ahuellamiento) (i.e., Shell, 1978; Asphalt Institute, 1982; MEPDG, 2004).

En este contexto y con base en las solicitudes de tránsito y ensayos propuestos es posible determinar la relación entre el tiempo de envejecimiento en laboratorio de mezclas asfálticas y la variación de sus propiedades mecánicas para diferentes periodos de servicio, ya que éstas no se encuentran definidas con precisión para las condiciones climáticas y geográficas de nuestro país. Además, las propiedades de los ligantes asfálticos presentan ciertas propiedades dentro de las normas vigentes que no se encuentran establecidas con precisión y representan una variable aleatoria y/o asumida dentro del estado del arte en cada país.

Así las cosas y tomando como referencia el método de envejecimiento acelerado mediante la cámara a presión PAV (INV E-751), esta investigación resulta pertinente porque mediante la comparación del desempeño mecánico de las mezclas asfálticas MDC-2 y las mezclas en servicio se logrará determinar para la ciudad de Bogotá, el tiempo en el cual las mezclas asfálticas presentan condiciones desfavorables para su correcta funcionalidad, y de esta manera definir con mayor certeza en las etapas de diseño de la estructura de pavimento, los tiempos de mantenimiento y/o rehabilitación de la vía.



## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Establecer la relación del tiempo en horas de envejecimiento en laboratorio que mejor se ajuste con el tiempo en años de mezclas asfálticas en servicio para la ciudad de Bogotá.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Replicar en laboratorio la mezcla asfáltica tipo MDC-2 ejecutado por la firma Concrecol S.A.
- Establecer el desempeño mecánico a fatiga y ahuellamiento de mezclas asfálticas tipo MDC-2 envejecidas naturalmente y en laboratorio.
- Obtener la curva maestra de ahuellamiento y fatiga por medio del PAV de mezclas asfálticas MDC-2.

## **5. MARCO TEÓRICO**

### **5.1. MARCO CONCEPTUAL**

#### **5.1.1. Mezcla Asfáltica**

Es un material de pavimentación que consta de un cemento asfáltico y un agregado mineral. El cemento asfáltico o cemento asfáltico modificado, actúa como un agente que aglutina las partículas de agregado convirtiéndola en una masa densa y una mezcla impermeable al agua. Cuando los materiales se aglutinan, el agregado mineral actúa como un esqueleto que imparte fuerza y resistencia al sistema (Bell, 1989).

El primer componente mencionado de la mezcla, el asfalto, es un material viscoelástico derivado del petróleo crudo o de depósitos naturales. La composición química es compleja, se compone principalmente de carbono (80-88%) y átomos de hidrógeno (8-12%). Otros elementos como el azufre (0-9%), oxígeno (0-2%) y nitrógeno (0-2%) están presentes, así como trazas de vanadio, níquel y magnesio (Lesuer, 2009) (Branthaver, 1994). Dada esta complejidad química es necesario indicar que el asfalto tiene una composición particular, dependiendo de la fuente en el proceso de destilación.

Existen muchos modelos, uno de ellos ampliamente aceptado es el propuesto por el Strategic Highways Research Program (SHRP 1987) menciona que se dispersan las partículas sólidas (asfaltenos) en una matriz aceitosa (maltenos). A través del proceso de absorción de elución por cromatografía líquida de asfaltenos en alúmina activa y las fracciones de maltenos se separan (Corbett, 1970). Los Maltenos se dividen en ácidos grasos saturados, compuestos aromáticos y resinas, que, junto con los asfaltenos son conocidos como fracciones SARA. Además, los asfaltenos son partículas sólidas responsables de la adhesión de los agregados, ácidos grasos

saturados y aromáticos que dan fluidez, mientras que las resinas proporcionan ductilidad. Por lo tanto, la combinación de ácidos grasos saturados, aromáticos y asfaltenos produce la condición de flujo de los asfaltos (Lesuer, 2009).

En este sentido, el asfalto combinado con el agregado pétreo (mezcla asfáltica) aporta resistencia y rigidez a la estructura de pavimento, cuyos valores dependen de las propiedades individuales de los materiales, las condiciones ambientales y de la carga que soporta la vía.

Se opta por utilizar mezclas asfálticas densas en caliente tipo MDC-2 (de acuerdo a INVIAS (2007), debido a que son las más utilizadas en Bogotá (sitio de estudio) para conformar capas de rodadura (las cuales son las que se encuentran sometidas de manera directa a las condiciones del ambiente). Estas mezclas en caliente son las más empleadas, debido a su flexibilidad, resistencia a la fatiga y economía entre otras características (Rondón y Reyes, 2009).

El envejecimiento del asfalto es un proceso en el que se producen cambios en las propiedades físicas con el tiempo, debido a los cambios en la composición química. Estos cambios se producen por la interacción de las variables en dos momentos diferentes, envejecimiento a corto plazo y envejecimiento a largo plazo. Los mecanismos de envejecimiento son la volatilización, la oxidación y endurecimiento estérico. Los dos primeros se producen por los cambios en la estructura molecular, mientras que el tercero por la interacción molecular. El término envejecimiento de asfalto, denominado endurecimiento por envejecimiento se utiliza para describir esos procesos de endurecimiento (Bell, 1989).

### **5.1.2. Desempeño Mecánico de las Mezclas Asfálticas**

Como resultado de la investigación del Strategic Highway Research Program (SHRP) realizada en 1991 y cuyo principal objetivo es el desarrollo de las especificaciones relacionadas con el desempeño de los cementos asfálticos (Anderson, et al., 1991), se introdujeron nuevos métodos o parámetros para medir más propiedades fundamentales que pueden ser fácilmente relacionadas con el comportamiento del pavimento.

Una forma de entender el comportamiento de la mezcla asfáltica consiste en considerar los tipos de inconveniencias en pavimentos asfálticos que los ingenieros tratan de evitar como son la deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento por bajas temperaturas (Bahia y Anderson, 1995).

Los ligantes asfálticos varían en su rigidez ( $G^*$ , resistencia total a la deformación) y su elasticidad relativa ( $\delta$ , distribución de la resistencia entre una parte elástica y una viscosa).

Para aplicaciones de los pavimentos, las dos características necesitan ser medidas a tasas de temperatura y carga para asemejar condiciones de tráfico y clima (Bahia y Anderson, 1995).

El problema del envejecimiento del asfalto comienza a hacerse notorio y preocupante porque se necesitan mezclas asfálticas que desarrollen mayor desempeño ya que los volúmenes de tráfico actuales y sus cargas sobrepasaron las expectativas y los alcances de las mezclas asfálticas desarrolladas durante el siglo pasado. Con el agravante de que estos volúmenes de tráfico se encuentran en crecimiento constante (Vargas y Reyes, 2010).

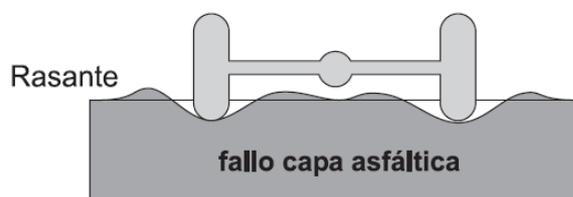
Este problema afecta la durabilidad de los pavimentos asfálticos, ocasionando pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas (Vargas y Reyes, 2010).

### 5.1.2.1. Ensayo de Ahuellamiento

Consiste en el deterioro gradual de la superficie y se manifiesta como una depresión bajo las bandas de circulación vehicular. Las causas que determinan la aparición de huellas en una estructura de pavimento son (Reyes y Reyes, 2006):

- La formación y acumulación de deformaciones plásticas en la base de las capas de materiales asfálticos.
- La disgregación de las capas de materiales granulares ante la aplicación de grandes esfuerzos verticales (Caicedo y Caro, 2002).

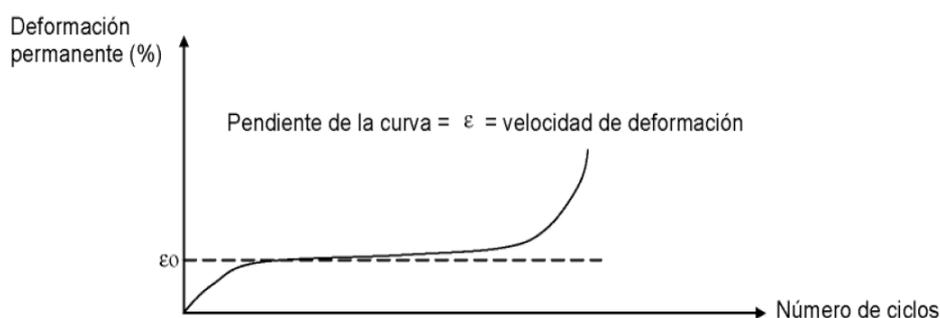
Las deformaciones permanentes o ahuellamiento en la mezcla asfáltica se caracterizan por un desplazamiento lateral a lo largo de la trayectoria de los vehículos en el plano de la mezcla, lo cual crea una depresión en el área de carga por donde circula la llanta y una cresta en ambos lados de la depresión (Figura 1). La aparición de deformaciones permanentes es causada por la falta de resistencia de la mezcla ante la solicitud de las cargas.



**Figura 1. Deformación permanente por fallo en la mezcla asfáltica.**

Fuente: Ruiz y Pérez, 2002.

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla asfáltica al paso repetido de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. El ensayo proporciona la relación entre el porcentaje de deformación permanente de la muestra en función del número de ciclos de carga a la que ha sido sometida (Figura 2).



**Figura 2. Curva típica de flujo de una mezcla asfáltica.**

Fuente: Aussedat, 1977.

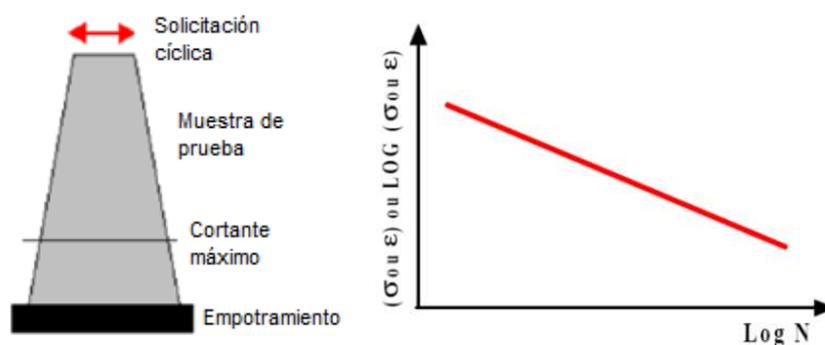
A temperaturas en el rango de 45 a 85°C, típicamente las temperaturas más altas de pavimentos en servicio, el mecanismo de falla es el ahuellamiento, y por lo tanto  $G^*$  y  $\delta$  necesitan ser medidos. Para la resistencia al ahuellamiento, a valores de  $G^*$  altos es favorable porque esto representa una alta resistencia total a la deformación. A bajos  $\delta$  es favorable porque refleja una mayor componente elástica (recuperación) del total de la deformación (Bahia y Anderson, 1995).

#### **5.1.2.2. Ensayo de Fatiga**

La fatiga en las mezclas asfálticas se manifiesta como el daño o deterioro debido a la repetición de sollicitaciones de los vehículos en un periodo determinado. Finalmente el aspecto de mayor relevancia consiste en determinar el número de ciclos que soporta la estructura antes de fracturarse (Reyes y Ortiz, 1997); (Cuellar, 2003).

Este ensayo consiste en someter una muestra, de geometría específica (Figura 3), a solicitaciones repetitivas e idénticas para determinar el número de ciclos de carga que puede soportar (Di Benedetto y De la Roche, 2005). 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. Esta situación explica la falta de conocimiento sobre el tema y la inexistencia de un modelo propio que caracterice el comportamiento a la fatiga a partir de las propiedades mecánicas (Rondón *et al*, 2008).

La prueba de fatiga realizada en el laboratorio consiste en someter una probeta del material de estudio a tensiones repetidas teniendo en cuenta el número de ciclos para llegar a la ruptura. La representación de los resultados es la curva de fatiga, esta curva se presenta en una escala logarítmica (Figura 3).



**Figura 3. Probeta trapezoidal**

Dentro de la zona de temperatura intermedia que es entre 10 y 25 °C para esta investigación, los asfaltos son generalmente duros y más elásticos que a temperaturas altas. El modo de falla que prevalece a estas temperaturas es el daño por fatiga, el cual es causado por ciclos de carga repetidos a niveles más bajos que la fuerza estática del material (Bahia y Anderson, 1995).

Los efectos de fatiga debido al tránsito o de las variaciones térmicas provocan fisuras y otras fallas superficiales que derivan en una mayor exposición a la intemperie y, por lo tanto, favorecen el envejecimiento (Bianchetto, 2006).

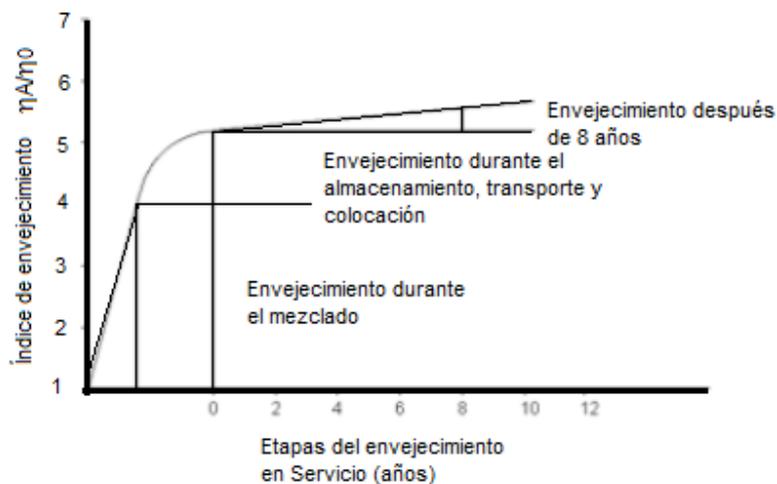
La selección de parámetros de fatiga es similar a los parámetros de ahuellamiento, en donde se consideran las condiciones climáticas por el ensayo de temperaturas promedio del pavimento. Los parámetros de ahuellamiento son medidos usando un modo de carga que simula las cargas de tráfico y se considera la naturaleza viscoelástica del material asfáltico (Huang y Zeng, 2007), generalmente el agrietamiento por fatiga ocurre tarde en la vida del pavimento, por lo tanto requiere el ensayo empleando el asfalto envejecido para simular las propiedades del ligante a largo tiempo en servicio (Anderson et al., 1991).

A temperaturas intermedias de pavimento el principal modo de falla es el agrietamiento por fatiga. La fatiga de un pavimento puede ser un fenómeno de esfuerzo controlado (típico para pavimentos de gran espesor) o un esfuerzo de deformación controlada (típico de pavimentos de poco espesor) (Bahia, et al., 1992). El Agrietamiento por fatiga, sin embargo, es conocido por ser más prominente en pavimentos con espesores delgados. Basado en el supuesto que el mecanismo de agrietamiento por fatiga es principalmente impulsado por relativamente grandes deformaciones de la capa superficial delgada bajo cargas de tráfico, esto puede considerarse como un fenómeno predominante de control de deformaciones (Bahia y Anderson, 1995).

### **5.1.3. Envejecimiento del Asfalto por medio del equipo P.A.V.**

Pressure Aging Vessel, por sus siglas en inglés PAV, es un proceso de envejecimiento propuesto por el Strategic Highway Research Project (SHRP) para simular a largo plazo el envejecimiento por oxidación en campo de ligantes asfálticos (Husain y Anderson, 1994). Este ensayo utiliza presión y temperatura para reducir el tiempo de ensayo, el periodo de envejecimiento puede ser simulado en solo 20 horas y se realiza en un recipiente presurizado. El método estima las propiedades fisicoquímicas de la mezcla asfáltica después de 5 a 10 años de envejecimiento en servicio.

De todas maneras es aceptado a nivel mundial que el envejecimiento sucede en dos etapas la primera el envejecimiento a corto plazo que ocurre en el momento de la mezcla, el transporte y la construcción. Esta etapa se caracteriza por que la mezcla experimenta la volatilización y una parte de la oxidación de una manera muy rápida, el proceso es llevado a cabo en cuestión de horas. La segunda etapa corresponde al envejecimiento de largo plazo asociado exclusivamente a la vida de servicio del pavimento. Allí las moléculas superficiales del pavimento reaccionan con las condiciones ambientales y se presentan procesos de oxidación, en contraste con la primera etapa, este proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años. Los efectos del envejecimiento a largo plazo son el incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica. En la Figura 4 se observa de manera esquemática las fases del envejecimiento (Fernández, Rondón y Reyes, 2011).



**Figura 4. Etapas en el proceso de envejecimiento**

Fuente: J. Read y D. Whiteoak, 2003

Se han identificado dos etapas en el proceso de envejecimiento de la mezcla de asfalto. El envejecimiento a corto plazo se produce durante la mezcla asfáltica en los primeros años de vida y determina la mayor magnitud de envejecimiento. Por el contrario, el envejecimiento a largo plazo se produce después de la construcción del pavimento y su magnitud a lo largo de la vida de servicio es más baja (Figura 4).

Para simular las fases de envejecimiento, se han definido que tratamientos utilizando calentamientos prolongados han sido los más adecuados para reproducir el envejecimiento a corto plazo, mientras que los tratamientos por oxidación y presión han sido mejores para simular el envejecimiento a largo plazo (Bahía, 1995).

## **5.2. MARCO DE ANTECEDENTES**

### **5.2.1. Envejecimiento de Asfalto utilizando la cámara de presión PAV (Pressure Aging Vessel)**

El envejecimiento y daño por humedad son los principales factores que afectan la durabilidad de las mezclas asfálticas (Airey, 2003). El proceso de envejecimiento de los asfaltos altera las propiedades físico-químicas del material y por ende la durabilidad de los pavimentos asfálticos, ocasionando pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas (Reyes y Vargas, 2009). El desarrollo de este Documento de investigación se basa en el estudio del desempeño de asfalto envejecidos a largo plazo, para tal efecto se emplea el equipo de presión PAV (por su siglas en inglés Pressure Aging Vessel), el cual se menciona en la investigación realizada por Bell en 1989 donde concluye que los métodos más recomendados para evaluar la durabilidad a largo tiempo son envejecimiento en horno, oxidación bajo presión, tratamiento con luz ultravioleta, tratamiento con humedad, y para corto tiempo son calentamiento y tratamiento con microondas.

Las primeras investigaciones realizadas en el área de envejecimiento de asfaltos y mezclas asfálticas datan desde principios del siglo pasado (Dow, 1903) como se cita en Bell (1989). Estas investigaciones se enfocaron al desarrollo de ensayos y métodos que relacionarán las propiedades del ligante en servicio con pruebas que simularan los efectos de la intemperie en condiciones aceleradas.

Cabe destacar el informe realizado por Bell (1989) el cual recopila los trabajos realizados en envejecimiento de mezclas y ligantes. Estas investigaciones realizadas se han enfocado en cuatro categorías de prueba de envejecimiento, clasificadas así:

- Procesos de calentamiento extendidos (calentamiento en hornos).
- Pruebas de oxidación.

- Pruebas de envejecimiento mediante radiación infrarroja y ultravioleta.
- Endurecimiento esterítico (Steric Hardening), Martínez (1005).

En este Capítulo se presenta una revisión de los estudios más relevantes relacionados con procesos de envejecimiento por métodos de calentamiento extendido (calentamiento en hornos), realizados para el cemento asfáltico y la mezcla asfáltica.

Dow (1903) envejeció mezcla asfáltica (MA) por 30 min a 149 °C en un horno convencional, determinó el cambio en peso, penetración, observó que el recuperado de la MA, presentaron una disminución en la penetración y en la pérdida de peso.

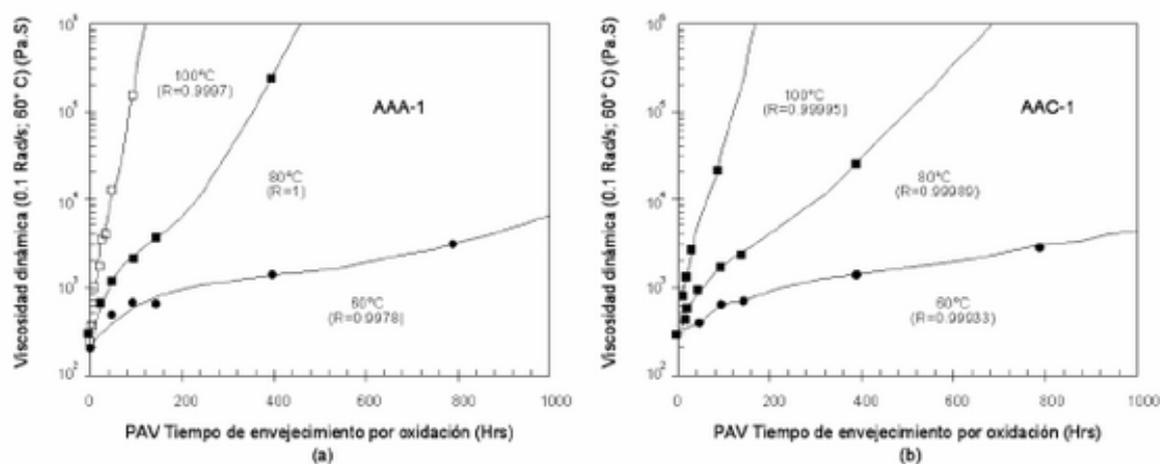
En los años cuarenta se introduce el método de envejecimiento en película fina (TFOT, Thin Film Oven Test), definiéndose el concepto de índice de envejecimiento que relaciona la viscosidad medida antes y después del envejecimiento de la muestra de asfalto, cuyo uso se extendió por varios años, hasta nuestros días. En esta misma década se empieza a correlacionar el envejecimiento de asfaltos en servicio y en laboratorio (Reyes y Vargas, 2010).

En 1989, Petersen oxidó muestras de asfalto mediante pruebas de envejecimiento acelerado en película fina (TFOT) y observó que el nivel de envejecimiento oxidativo (índice de envejecimiento) y de endurecimiento en las pruebas aceleradas era menor con respecto a la oxidación alcanzada en condiciones reales de servicio, deduciendo que estas pruebas oxidativas simuladas reflejan el envejecimiento que ocurre a los asfaltos en las plantas de mezcla en caliente. Adicionalmente, expuso que la cinética de envejecimiento simulado de los asfaltos es diferente a la que se lleva a cabo bajo condiciones reales.

Simultáneamente, Bell (1989) estudió el envejecimiento de sistemas asfalto-agregado reportando los resultados de investigación del estudio de pruebas de envejecimiento aplicadas a mezclas asfalto-agregado en el marco del programa SHRP (Strategic Highway Research Program) y propuso que el envejecimiento a largo plazo se debía a

la oxidación progresiva de la mezcla mientras está en servicio. Empleó un horno de envejecimiento de largo plazo en especímenes de mezcla asfáltica compacta calentada a 107 °C, con lo que observó un daño a los especímenes por la alta temperatura. Recomendó envejecer las mezclas asfálticas en un horno de envejecimiento a 135 °C durante 4 h para simular el envejecimiento a corto plazo y envejecer en el horno a mezclas densas a 85 °C por 5 días o a 100 °C durante 2 días para simular el envejecimiento a largo plazo.

Huh y Robertson (1996) realizaron un estudio para determinar los cambios en la viscosidad como medida del progreso del envejecimiento, por efecto de la oxidación del asfalto. Utilizaron el PAV con una presión de 2.07 Mpa (300 psi) a temperaturas de 60° C por 800 hr, 80°C por 400 hr y 100°C por 96 hr, previo a ello envejecieron muestras de película delgada en el TFO (Thin Film Oven), por cinco horas a 163°C para determinar la pérdida de volátiles simulando el envejecimiento a corto plazo (Fernández, Rondón y Reyes, 2011).



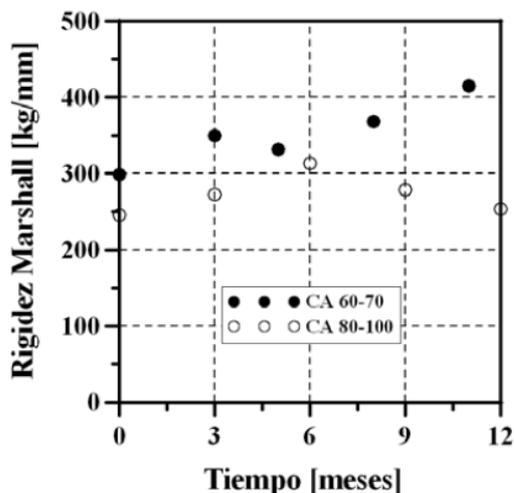
**Figura 5. Cambio de la viscosidad debido a la Oxidación en PAV, de dos asfaltos diferentes**

Fuente: Huh y Robertson, 1996

Abbas (2002), empleó los equipos RTFOT y recipiente de envejecimiento por presión (por sus siglas en inglés PAV) para simular el envejecimiento durante la construcción de la carpeta asfáltica y el presentado después de 5 años a 10 años de servicio. Las propiedades reológicas a baja temperatura y las relacionadas con la fatiga se midieron después del envejecimiento por 2 métodos alternativos RTFOT + PAV y PAV con la prueba del equipo del reómetro de flexión de vigas (por sus siglas en inglés BBR) y con el equipo del reómetro de corte dinámico (por sus siglas en inglés DSR).

En la prueba de BBR, se observó que los métodos tienen un efecto más pronunciado en el cemento asfáltico altamente modificado. Con la prueba del DSR, se observó que las determinaciones de los tres ligantes fueron más consistentes cuando se envejecieron con RTFOT + PAV que directamente con el PAV. Los dos métodos proporcionaron diferencia en las propiedades a temperatura baja, excepto para las del ligante no modificado y fueron significativos en las mediciones hechas con el DSR para todos los ligantes. El envejecimiento con RTFOT + PAV afecta las propiedades reológicas de manera diferente que únicamente con el PAV (Hernández y Chávez, 2009).

El envejecimiento a largo plazo se presenta debido a procesos de oxidación y algunos endurecimientos estéricos de la mezcla (Airey, 2003). Lo anterior también se soporta con base en lo reportado en otras investigaciones (Vargas y otros, 2008, Álvarez y Afanasjeva, 2004) en donde el envejecimiento por oxidación (a largo plazo) presenta un cambio en las propiedades viscoelásticas del asfalto determinado por un incremento en el módulo elástico  $G^*$  donde ocurre mayor estructuración del asfalto o un incremento en la conectividad de las moléculas del material (Rondón, Reyes, Moreno, Vargas, 2008), lo cual se observa en la Figura 6.

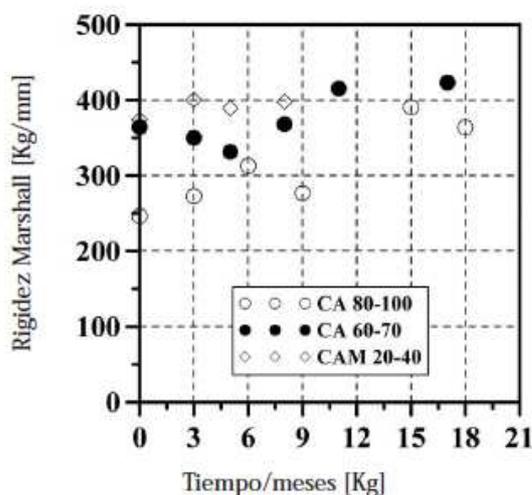


**Figura 6. Evolución de la relación entre la estabilidad y el flujo (rigidez Marshall) con el tiempo de envejecimiento para mezclas elaboradas con CA 80-100 y CA 60-70.**

Fuente: Rondón, Reyes, Moreno y Vargas, 2008

La tendencia de la mezcla con el tiempo de exposición es a producirse un aumento en los valores de rigidez, debido principalmente a procesos de endurecimiento por envejecimiento del ligante asfáltico. Este aumento en rigidez genera incremento de la resistencia a la deformación permanente y disminución de la vida de fatiga de la mezcla analizada (Rondón, Reyes, Vacca, 2010).

En la Figura 7 se observa la evolución en el tiempo ( $t$ , en meses) de los parámetros de Rigidez Marshall (relación entre la estabilidad  $E$  y el flujo  $F$ ). Este parámetro puede entenderse como un aumento de resistencia mecánica evaluada con el tiempo de exposición en el estado de falla de las mezclas, bajo carga monotónica en un ensayo de tracción indirecta.



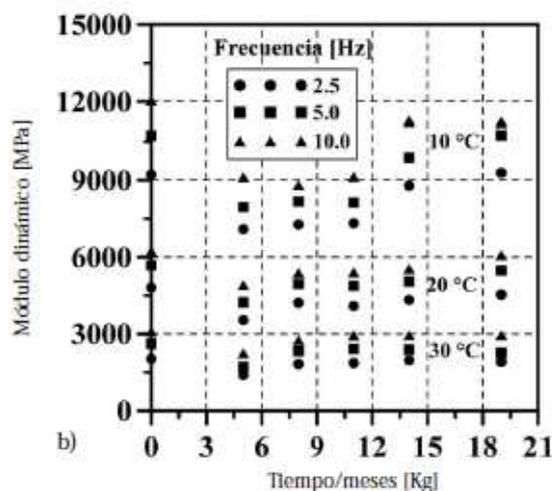
**Figura 7. Relación E/F (rigidez Marshall) con el tiempo de envejecimiento, para mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CAM 20-40.**

Fuente: Rondón y Reyes, 2009

Entre los 3 y 6 meses se observa una disminución de la relación E/F lo cual puede asociarse por los siguientes dos procesos:

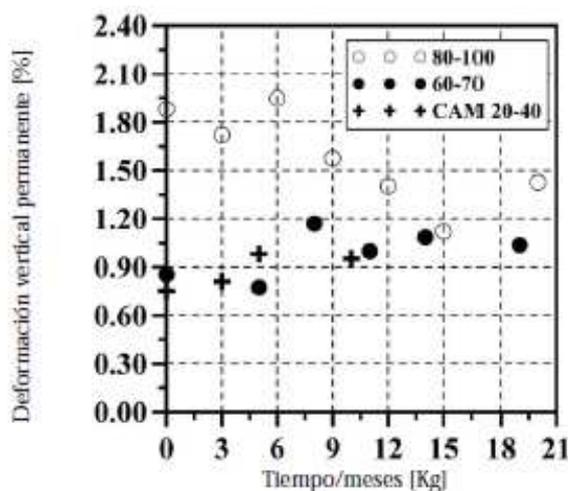
- Envejecimiento por oxidación que experimenta el cemento asfáltico, y por lo tanto las mezclas, cuando es solicitado a diferentes gradientes de temperatura y exposición a radiación ultra-violeta (UV).
- El agua en las mezclas produce pérdida de adherencia entre el agregado pétreo y el asfalto, lo cual genera un aumento del flujo y disminución de la relación estabilidad - flujo.

En este mismo de estudio desarrollado por Rondón y Reyes (2009), se presenta la evolución del módulo resiliente y la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) donde se observa un incremento típico del módulo cuando se aumenta la frecuencia de carga y disminuye la temperatura del ensayo, lo anterior se manifiesta en la tendencia a disminuir los valores de deformación.



**Figura 8. Evolución del módulo resiliente con el tiempo de envejecimiento para mezclas fabricadas con CA 60-70.**

Fuente: Rondón y Reyes, 2009



**Figura 9. Evolución de la deformación vertical permanente con el tiempo de envejecimiento para mezclas fabricadas con CA 80-100, CA 60-70 y CAM 20-40.**

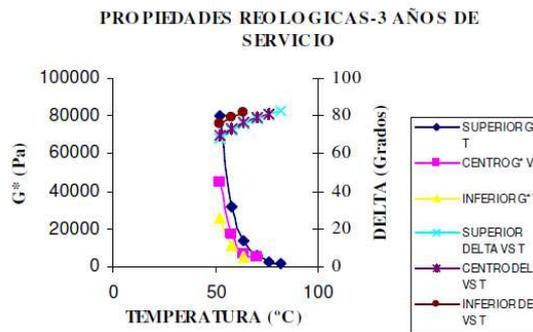
Fuente: Rondón y Reyes, 2009

Como se ha demostrado en otras investigaciones (Afanasieva y Álvarez, 2004; Vargas, 2008), el envejecimiento oxidativo ejerce una gran influencia en las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico reflejado en el incremento del

módulo elástico  $G^*$ , resultado del aumento de las interacciones moleculares del asfalto como: fuerzas dispersivas, puentes de hidrógeno e interacciones polares, especialmente de los asfaltenos, que en conjunto resultan en una mayor estructuración del asfalto o un incremento en la conectividad de las moléculas del material (Reyes y Rondón, 2009).

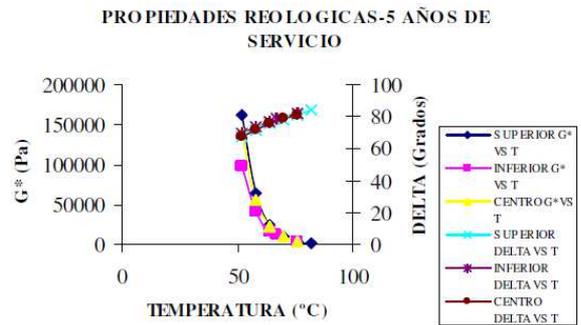
Así mismo, en un estudio ejecutado por Universidad de los Andes “Estudio del envejecimiento de mezclas asfálticas por oxidación” (Parada, Lepesqueur y Caicedo) se presentaron curvas reológicas de mezclas en servicio en la cual se emplea para caracterizar las propiedades visco-elásticas del asfalto, midiendo el modulo complejo en corte ( $G^*$ ) y el ángulo de fase ( $\delta$ ), de lo anterior y para el desarrollo de esta investigación se tiene en cuenta la relación que se obtiene de los módulos para las edades de servicio de 3, 5, y 7 años y por otro lado, los valores obtenidos para este parámetro de las mezclas asfálticas envejecidas a 15 y 20 horas en PAV bajo temperaturas entre 90 y 100°C y presión de 100 y 210 psi.

En función de lo anterior, se tienen los siguientes resultados para las mezclas envejecidas naturalmente en periodos de 3, 5 y 7 años.



**Figura 10. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 3 años.**

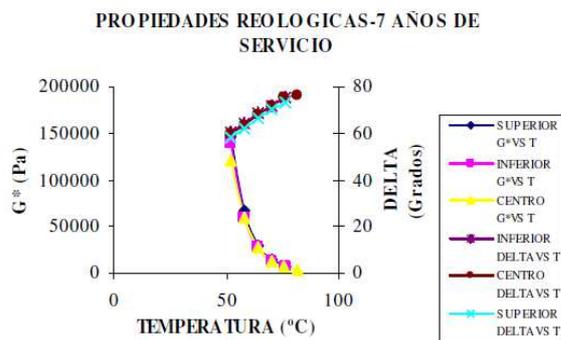
Fuente: Parada, Lepesqueur y Caicedo, 2005.



**Figura 11. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 5 años.**

Fuente: Parada, Lepesqueur y Caicedo, 2005.

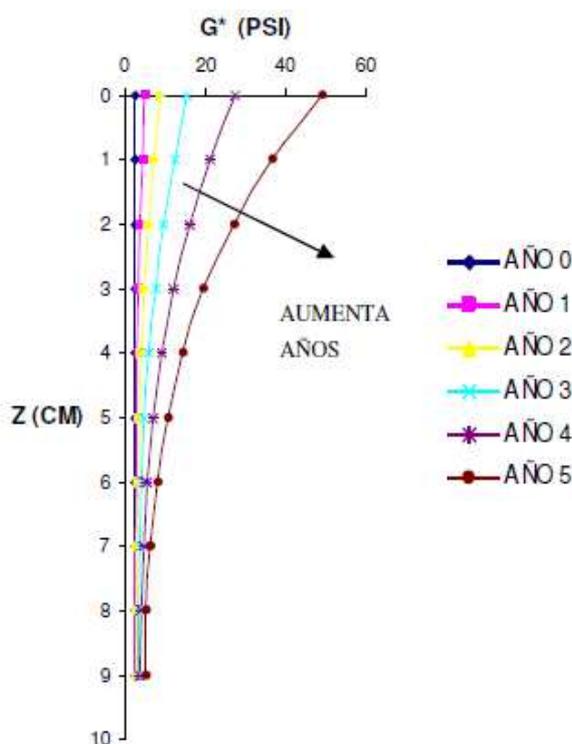
Teniendo en cuentas las propiedades reológicas de las mezclas asfálticas envejecidas naturalmente para 3, 5 y 7 años, se observa un aumento significativo en los valores presentados de  $G^*$  donde se incrementan cerca de un 50% los datos reportados en laboratorio para muestras en servicio de 3 a 5 años y de 5 a 7 años.



**Figura 12. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas naturalmente a los 7 años.**

Fuente: Parada, Lepesqueur y Caicedo, 2005.

Así mismo, recopilando la información anterior, se presenta la variación de la propiedad reológica  $G^*$  a profundidad para todas las muestras analizadas. Se observa el aumento de la viscosidad a medida que se incrementa el tiempo de envejecimiento en años.

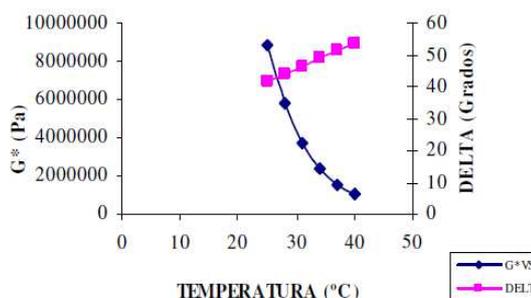


**Figura 13. Estimación de la viscosidad y su variación según la profundidad y el tiempo de servicio. El  $G^*$  se toma a una  $T=52^{\circ}\text{C}$ .**

Fuente: Parada, Lepesqueur y Caicedo, 2005.

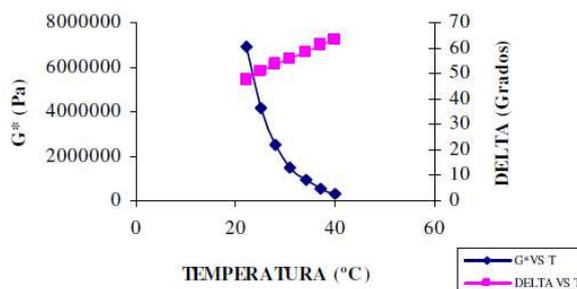
De igual manera que las mezclas en servicio, el estudio desarrollado por a Universidad de los Andes ejecuta los mismos ensayos para mezclas envejecidas en laboratorio, en donde se reportan los siguientes resultados para los tiempos de envejecimiento de 20 horas en PAV variando la presión y temperatura, donde ésta última variable es la que más afecta las propiedades reológicas en el tiempo de ejecución del ensayo. Lo anterior, se resalta en lo definido por Bahia y Anderson (1995) donde se define que para la resistencia al ahuellamiento, a valores de  $G^*$  altos es favorable porque esto representa una alta resistencia total a la deformación. A

bajos  $\delta$  es favorable porque refleja una mayor componente elástica (recuperación) del total de la deformación.



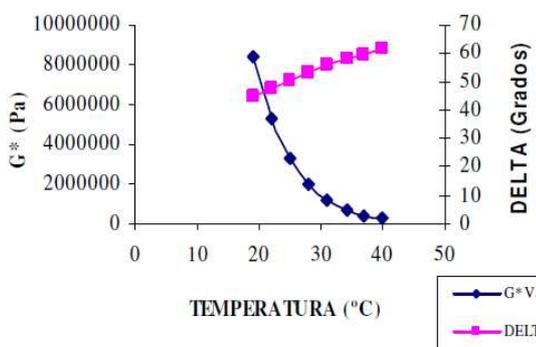
**Figura 14. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en condición de Temperatura: 90 °C, Presión= 210 PSI, Tiempo: 20 Horas.**

Fuente: Parada, Lepageur y Caicedo, 2005.

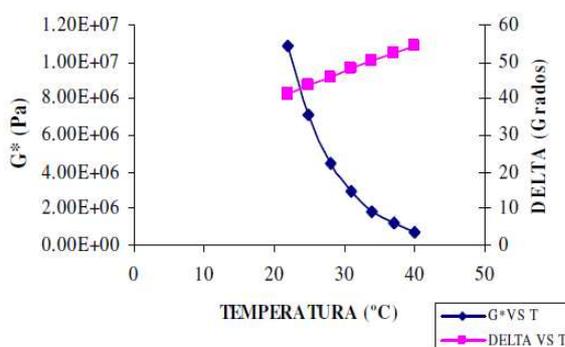


**Figura 15. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en condición de Temperatura: 110 °C, Presión= 100 PSI, Tiempo: 20 Horas.**

Fuente: Parada, Lepageur y Caicedo, 2005.



**Figura 16. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en condición de Temperatura: 110 °C, Presión= 210 PSI, Tiempo: 15 Horas.**

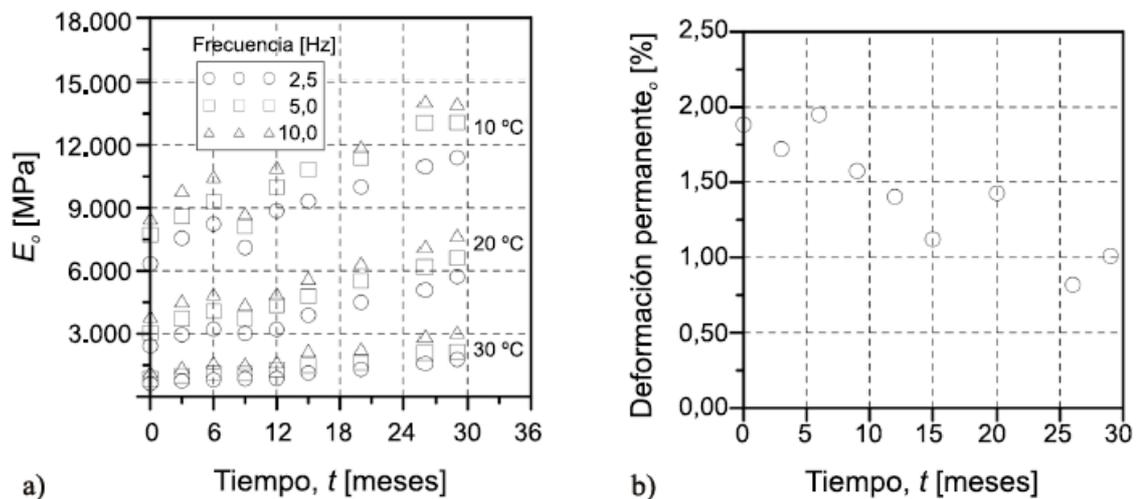


**Figura 17. Propiedades reológicas mezclas asfálticas envejecidas aceleradamente en condición de Temperatura: 100 °C, Presión= 210 PSI, Tiempo: 20 Horas.**

Fuente: Parada, Lepageur y Caicedo, 2005.

### 5.2.2. Investigaciones relacionadas con Ensayos de Ahuellamiento

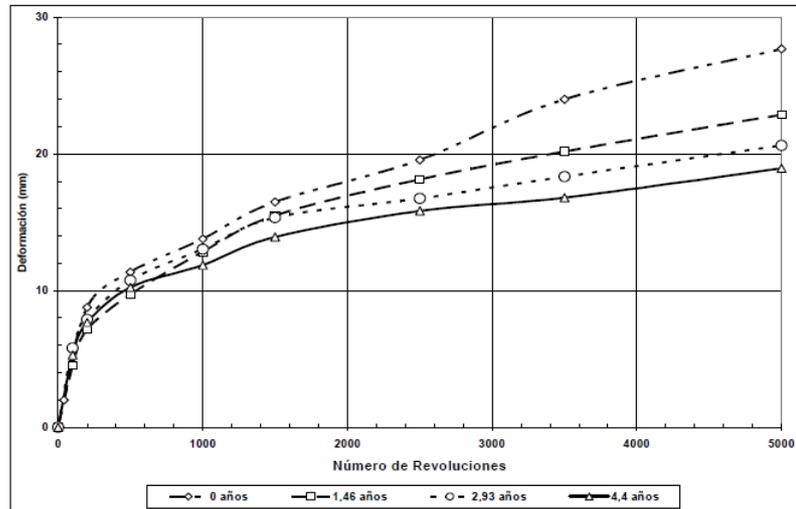
Teniendo en cuenta la investigación realizada por la Universidad Javeriana (Rondón, Reyes y Vacca) en 2010, se encuentra que existe una correlación directa entre el Módulo de Rigidez de la mezcla y su resistencia al ahuellamiento, donde en la siguiente ilustración se presenta que a medida que aumenta el valor de  $E_0$  existe un decremento en el porcentaje de deformación permanente (ahuellamiento). Se resalta que aunque este tipo de mezcla se realizó con asfalto CA 80-100, se toma en cuenta para esta investigación únicamente la tendencia con pendiente negativa que presenta la curva de ahuellamiento para condiciones climáticas de la ciudad de Bogotá-Colombia.



**Figura 18. a) Evolución del módulo resiliente  $E_0$ , con el tiempo de exposición  $t$ . b) Evolución de la deformación permanente vertical con el tiempo de exposición  $t$ .**

Fuente: Rondón, Reyes, Moreno y Vargas, 2008.

En este sentido, el desempeño por ahuellamiento disminuye con el tiempo envejecimiento a largo plazo. Durante los ciclos de carga inicial, la deformación vertical es alta y a continuación, se vuelve casi constante. Sin embargo, la deformación es menor en las mezclas de edad (envejecidas) que en los originales.



**Figura 19. Efecto del envejecimiento de las mezclas de asfalto en deformación vertical.**

Fuente: Reyes y Camacho, 2008.

Sousa (1991) presenta los principales factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento de mezclas asfálticas y adicionalmente, presenta la influencia que tiene el cambio de estos factores sobre el aumento o la disminución de las deformaciones permanentes en estos materiales.

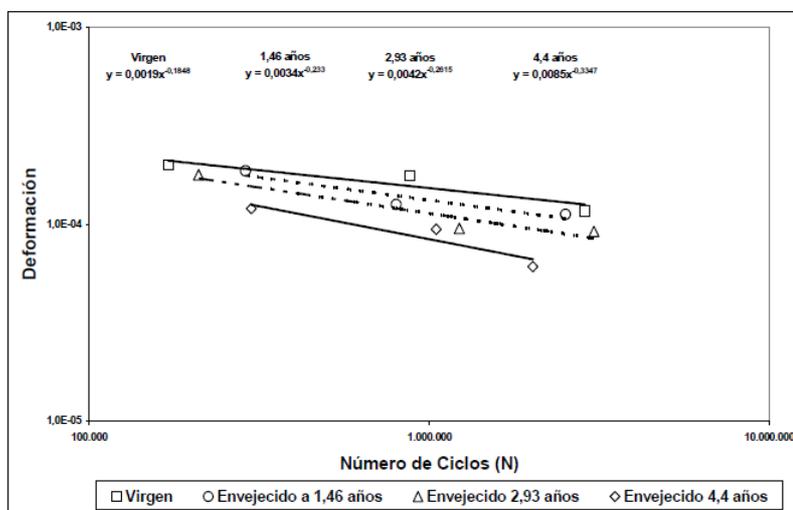
**Tabla 1. Factores que afectan el ahuellamiento en mezclas asfálticas.**

	<b>Factor</b>	<b>Cambio en el factor</b>	<b>Efecto sobre la resistencia al ahuellamiento</b>
Agregados pétreos	Textura superficial	Liso a rugoso	Incrementa
	Forma	Redonda a angular	Incrementa
	Tamaño	Incremento en tamaño máximo	Incrementa
Ligante asfáltico	Rigidez	Incremento	Incrementa
Mezcla	Contenido de ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos	Incremento	Disminuye
	Grado de compactación	Incremento	Incrementa
Condiciones de campo	Temperatura	Incremento	Disminuye
	Esfuerzo/deformación	Incremento	Disminuye
	Repeticiones de carga	Incremento	Disminuye
	Agua	Seco a húmedo	Disminuye

Fuente: Rondón y Reyes, 2009

### 5.2.3. Investigaciones relacionadas con Ensayos de Fatiga Trapezoidal

Para un estudio efectuado Reyes O y Camacho J (2008), la pendiente ley de la fatiga es mayor para mezclas envejecidas en contraste con mezclas sin ningún tratamiento de envejecimiento (Figura 20). Las simulaciones indican que el envejecimiento disminuye la vida de fatiga.



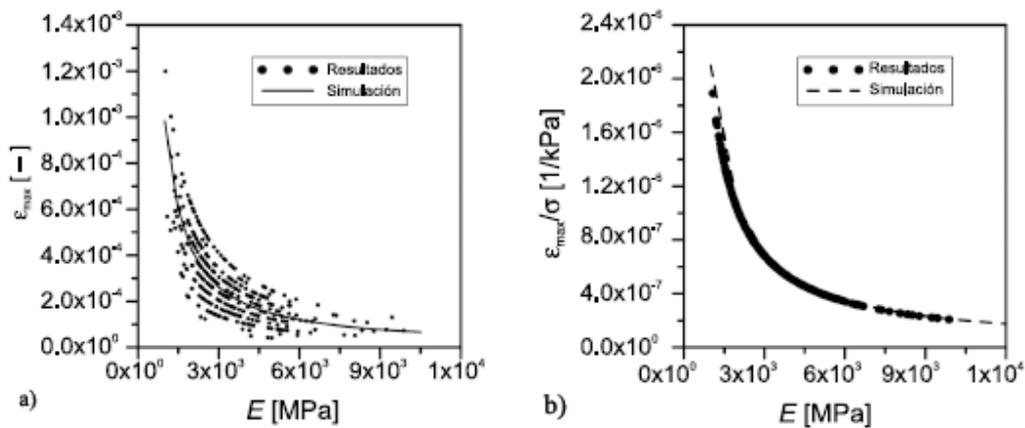
**Figura 20. Efecto del envejecimiento de las mezclas de asfalto en la resistencia a la fatiga.**

Fuente: Reyes y Camacho, 2008.

El efecto del envejecimiento sobre la vida a la fatiga de una mezcla asfáltica sometida a ensayos bajo deformación controlada no es claro. Algunos investigadores como Harvey y Tsai (1997) reportan que un incremento en la rigidez de mezclas asfálticas como producto del envejecimiento en laboratorio del ligante asfáltico no necesariamente reduce la vida de fatiga de mezclas, mientras que otros como Schmidt y Santucci (1969), Raad, Saboundjian y Minassian (2001) y Walubita (2005) reportan lo contrario. A pesar de lo anterior, lo que sí se reporta con claridad en la literatura de referencia para los estudios de fatiga bajo deformación controlada es que un incremento en la rigidez redundaría en una disminución de la vida de fatiga de las mezclas. Por lo tanto, según lo presentado por Reyes, Rondón y

Vacca (2010), si una mezcla envejece, se rigidiza, disminuyendo su resistencia al fenómeno de fatiga por este efecto, y además esta disminución se acentúa debido a la tendencia de la mezcla a fragilizarse. El fenómeno expuesto es más apreciable a bajas temperaturas de servicio (Epps, 1969; Raad, Saboundjian y Minassian, 2001; Walubita, 2005).

En función de lo anterior, se presenta el siguiente resultado de estudio (Figura 21) donde se observa la disminución de los valores de  $\epsilon_{\max}$  (amplitud de deformación) a medida que se incrementa el módulo resiliente de las mezclas  $E$ .

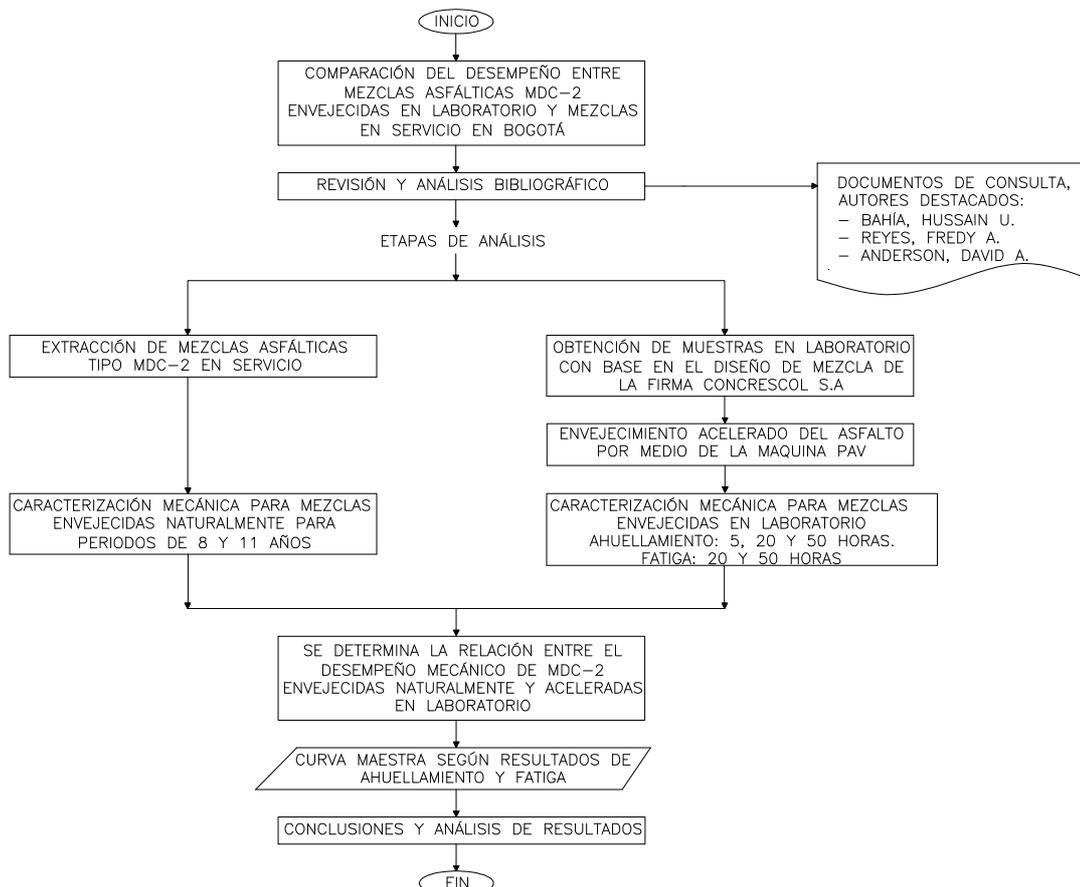


**Figura 21. Evolución de a)  $\epsilon_{\max}$  y b)  $\epsilon_{\max}/\sigma$  con  $E$ . Resultados obtenidos para 360 muestras.**

Fuente: Rondón, Reyes y Vacca, 2010

## 6. METODOLOGÍA

Durante el proceso de caracterizar mecánicamente las mezclas en servicio durante su tiempo de servicio, se ha evidenciado (según lo descrito en capítulos anteriores) una relación directa entre métodos de envejecimiento y desempeño mecánico con muestras elaboradas en laboratorio, en este sentido, se ha definido el siguiente proceso de elaboración para la comparación de mezclas asfálticas cuyo envejecimiento se denomina natural está en función del tiempo de servicio (en años) mientras que las envejecidas en laboratorio están definidas en horas de exposición a la máquina PAV. En la Figura 22 se presenta el diagrama de flujo establecido para la Investigación a desarrollar.



**Figura 22. Diagrama de flujo.**

## 6.1. EXTRACCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS TIPO MDC-2 EN SERVICIO

Con base en la información suministrada por la firma Concescol S.A, se eligieron los tramos viales en donde se extrajeron las muestras de acuerdo con los años de servicio que éstas presenten (entre 8 y 11 años).

Dimensiones y cantidad de núcleos a extraer:

- Ahuellamiento: Las dimensiones de los especímenes fueron de 30 cm x 30 cm x 5 cm. Se extrajeron para cada ensayo dos (2) panelas.

En las siguientes figuras se observan las panelas extraídas de las mezclas en servicio para 8 y 11 años de servicio (Calle 153 y Cicloruta respectivamente).



a) Muestra extraída de la Calle 153. 8 años de servicio.



b) Muestra extraída de la Cicloruta de la Carrera 11. 11 años de servicio.

**Figura 23. Muestras extraídas en servicio para ensayos de ahuellamiento.**

- Fatiga: Las dimensiones de los especímenes deben tener un ancho mayor  $B = 7.5$  cm, ancho menor  $b = 2.5$  cm, Altura  $H = 25$  cm y espesor  $e=2.5$  cm. Se extraerán para cada ensayo 12 probetas.

En las siguientes figuras se observan el proceso de extracción de las doce muestras para la ejecución del ensayo de Fatiga Trapezoidal.





**Figura 24. Delimitación de las panelas para ensayo de Fatiga Trapezoidal.**

## **6.2. OBTENER MUESTRAS EN LABORATORIO CON BASE EN DISEÑOS DE MEZCLA DE LA FIRMA CONCRESCOL S.A., PARA ENVEJECERLAS ACELERADAMENTE POR MEDIO DEL PAV**

Teniendo en cuenta el diseño de mezcla definido por Concescol S.A., se replicó en laboratorio la mezcla asfáltica tipo MDC-2 para posteriormente realizar un envejecimiento acelerado utilizando la cámara de envejecimiento a presión (PAV).

Vale la pena resaltar que el diseño de mezcla a evaluar, realizado por la firma Concescol S.A, cumple con los requisitos estipulados en la Normatividad INVIAS, artículo 450-07, en donde la caracterización de agregados pétreos se encuentra regida bajo la franja granulométrica apreciada en la Figura 25.



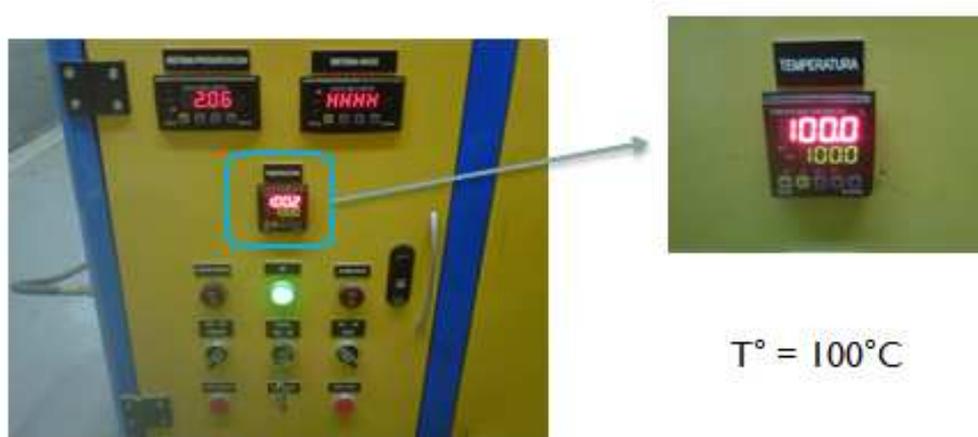
En la siguiente tabla se presentan los ensayos mínimos de calidad que deben cumplir las mezclas asfálticas a ensayar.

**Tabla 2. Ensayos mínimos de calidad para agregados pétreos de mezcla asfáltica.**

Ensayo	Norma	Valor especificado INV 450
Superficie específica gradación combinada	---	NA
Índice de Plasticidad	INV E-125-126	NL-NP
Equivalente de arena	INV E-133	50% mín.
Peso específico del agregado grueso	INV E-223	NA
Absorción del agregado grueso	INV E-223	NA
Peso específico de la arena trituración	INV E-222	NA
Absorción de la arena trituración	INV E-222	NA
Peso específico de la arena de río	INV E-222	NA
Absorción de la arena de río	INV E-222	NA
Índice de Alargamiento	INV E-230	30% máx.
Índice de Aplanamiento	INV E-230	30% máx.
Caras Fracturadas	INV E-227	75% mín.
Solidez en sulfato de Magnesio Grava	INV E-220	18% máx.
Solidez en sulfato de Magnesio Arena Trit.	INV E-220	18% máx.
Solidez en sulfato de Magnesio Arena Natur	INV E-220	18% máx.
Desgaste Gradación B	INV E-218-219	25% máx.
Micro Deval	INV E-239-07	20% máx.
Contenido de Impurezas	INV E-237	0.5% máx.
Coefficiente Pulimento Acelerado del agregado grueso	INV E-232	0.45 mín.
Azul de Metileno Gradación Combinada	INV E-235	10 máx.

Fuente: Norma INVIAS 2007, Artículo 540.

Para el envejecimiento del asfalto utilizando el equipo PAV, se selecciona una temperatura de envejecimiento y se precalienta la cámara de presión a la temperatura de envejecimiento seleccionada.



**Figura 27. Selección de temperatura para el ensayo de PAV.**

Posteriormente, se coloca el asfalto 60 - 70 en diez (10) bandejas de acero inoxidable agregando 50 gr a cada una.



**Figura 28. Disposición del asfalto en las bandejas del PAV.**

Se coloca la repisa con las bandejas llenas dentro de la cámara de presión y se cierra.



**Figura 29. Equipo de PAV empleado de la Pontificia Universidad Javeriana.**

Finalmente, se aplica una presión de aire de 2.07 MPa y se inicia el registro del tiempo del ensayo hasta que cumpla el tiempo de envejecimiento deseado.



Presión = 2.07 MPa



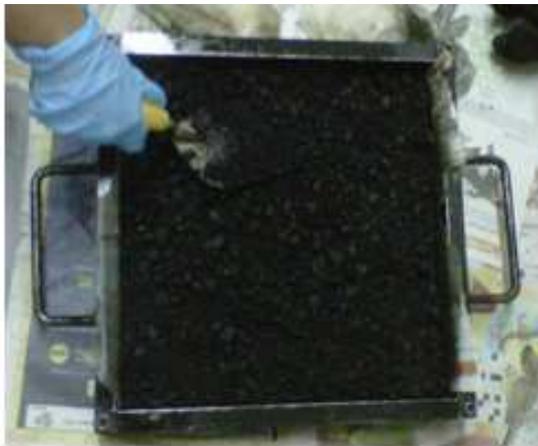
**Figura 30. Presión para envejecimiento a largo plazo empleando el equipo PAV.**

Para la obtención de las panelas de mezcla asfáltica para la ejecución de los ensayos de ahuellamiento y fatiga se definieron de la siguiente manera. En la siguiente figura se observa el procedimiento descrito.

1. Se calienta el asfalto a 150°C y el agregado a 170°C. Al alcanzar las temperaturas deseadas se procede a hacer el mezclado.



2. Posteriormente se vacía la mezcla en el molde de compactación para fatiga y para ahuellamiento.



Molde – Ahuellamiento  
L = 30 cm  
Ancho = 30cm  
Profundidad = 5cm



Molde – Fatiga  
L = 30cm  
Ancho = 50cm  
Profundidad = 3cm

**Figura 31. Procedimiento para la ejecución de ensayos de ahuellamiento y fatiga trapezoidal.**

3. Por último, se compacta la mezcla con el compactador universal aplicando una presión vertical de 600 kPa durante 8 minutos.



### **6.3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AHUELLAMIENTO (NORMA INV E-756)**

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla asfáltica al paso repetido de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida.

Procedimiento:

El ensayo se realiza a una temperatura constante de 60°C, haciendo pasar una rueda metálica, de 20 cm de diámetro, que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 kN/m<sup>2</sup>. Durante el ensayo se determinan las deformaciones totales de la probeta en los minutos 1, 3 y 5 y a continuación cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.



**Figura 32. Equipo de Ahuellamiento de la Pontificia Universidad Javeriana.**

#### **6.4. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE FATIGA (NORMA FRANCESA NFP-98-261)**

Consiste en someter una probeta del material de estudio a tensiones repetidas teniendo en cuenta el número de ciclos para llegar a la ruptura.

Procedimiento:

- Se coloca la muestra en moldes metálicos.
- Los moldes metálicos se llevan a la prensa universal estática para su compactación.

- Después de un día de compactada la muestra, se retira del molde y se corta en forma trapezoidal con  $B=7.5$  cm,  $b= 2.5$  cm,  $H=25$  cm y  $e=2.5$  cm.
- Después de cortadas, se pega en la máquina de fatiga con un epóxico en la base inferior y en la parte superior a una platina fija, con el fin de transmitir fuerzas cíclicas a una frecuencia determinada.
- Finalmente el equipo toma lecturas automáticas y las reporta al terminar el ensayo.



**Figura 33. Equipo de fatiga trapezoidal de la Pontificia Universidad Javeriana.**

### **6.5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE EL DESEMPEÑO MECÁNICO DE MEZCLAS ENVEJECIDAS NATURALMENTE Y ACELERADAS EN LABORATORIO CON EL FIN DE OBTENER LA CURVA MAESTRA DE AHUELLAMIENTO Y FATIGA.**

Con base en los resultados obtenidos de los ensayos de ahuellamiento y fatiga, se establece la relación entre las mezclas envejecidas naturalmente y aceleradas por medio de las curvas maestras definidas a partir de los parámetros arrojados en cada ensayo.

## 7. RESULTADOS

De acuerdo con la Metodología de investigación descrita en el capítulo anterior, en los siguientes subcapítulos se presentan los resultados obtenidos para las muestras de mezcla asfáltica ensayadas bajo las premisas establecidas en las normativas vigentes.

En la siguiente tabla se presentan los ensayos realizados para las mezclas fabricadas en laboratorio y extraídas en campo. Se debe tener en cuenta que los resultados del ensayo de fatiga trapezoidal para una mezcla MDC-2 sin envejecer son tomados de la tesis de maestría “Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión” de la Pontificia Universidad Javeriana.

**Tabla 3. Ensayos realizados sobre las mezclas asfálticas.**

Tipo de mezcla	Tipo de ensayo realizado sobre la muestra	
	Ahuellamiento INV-E-756-07	Fatiga Trapezoidal NFP-98-261
Mezcla fabricada en laboratorio envejecida a 0 Horas en PAV	Si	No*
Mezcla fabricada en laboratorio envejecida a 5 Horas en PAV	Si	No
Mezcla fabricada en laboratorio envejecida a 20 Horas en PAV	Si	Si
Mezcla fabricada en laboratorio envejecida a 50 Horas en PAV	Si	Si
Mezcla en servicio sobre la Calle 153 (8 años de servicio)	Si	Si
Mezcla en servicio sobre la Cicloruta de la Carrera 11 (11 años de servicio)	Si	Si

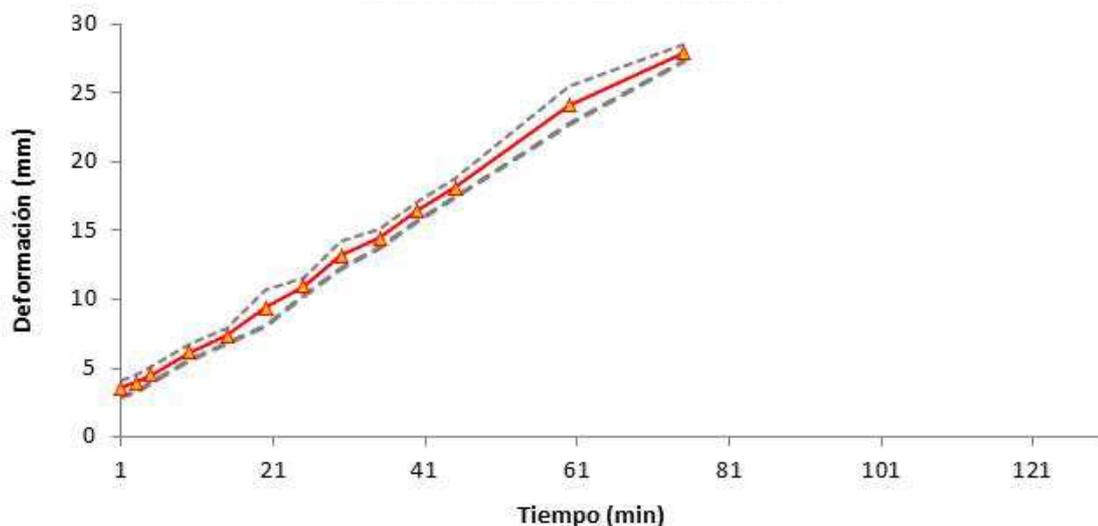
\*Se toman los resultados extraídos de la tesis de maestría “Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión” teniendo en cuenta que este ensayo se efectuó bajo las mismas características definidas en esta Investigación.

## 7.1. AHUELLAMIENTO

Como se menciona anteriormente, a continuación se presentan los valores obtenidos del ensayo de ahuellamiento con base en la normativa INV-E-756-07. El ensayo se realiza para dos panelas de la misma muestra para posteriormente obtener la curva de ahuellamiento con base en el promedio de estos datos (por cada muestra se toman 3 lecturas, teniendo así una curva por mezcla de valores promedios de 6 puntos diferentes), en este sentido, se reportan los resultados en este orden.

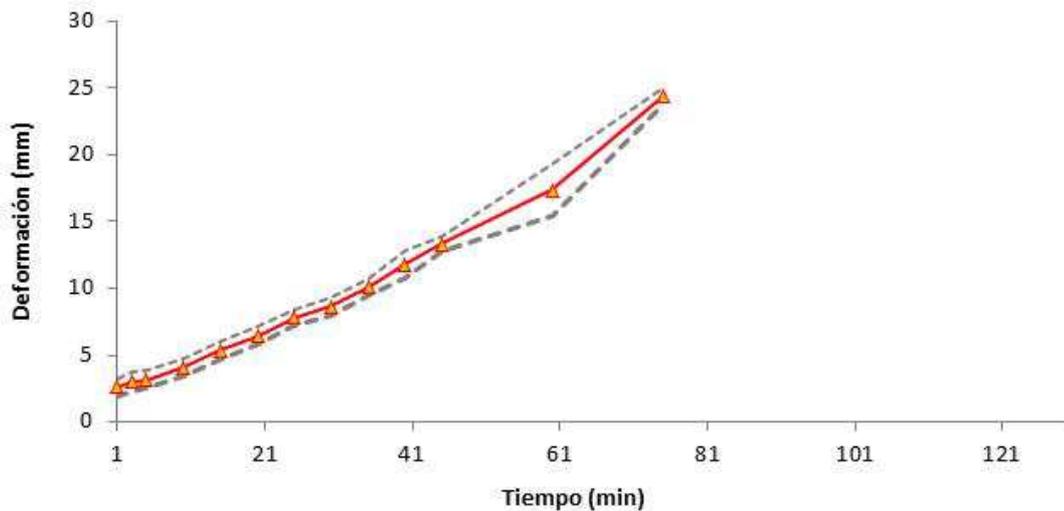
### 7.1.1. Mezclas Envejecidas por medio del Equipo PAV.

Este tipo de ensayo se realiza para cuatro (4) tipos de mezclas, con unos periodos de envejecimiento empleando la máquina PAV a 0, 5, 20 y 50 horas. Los resultados presentados a continuación se pueden observar en el **Anexo A** del presente documento.

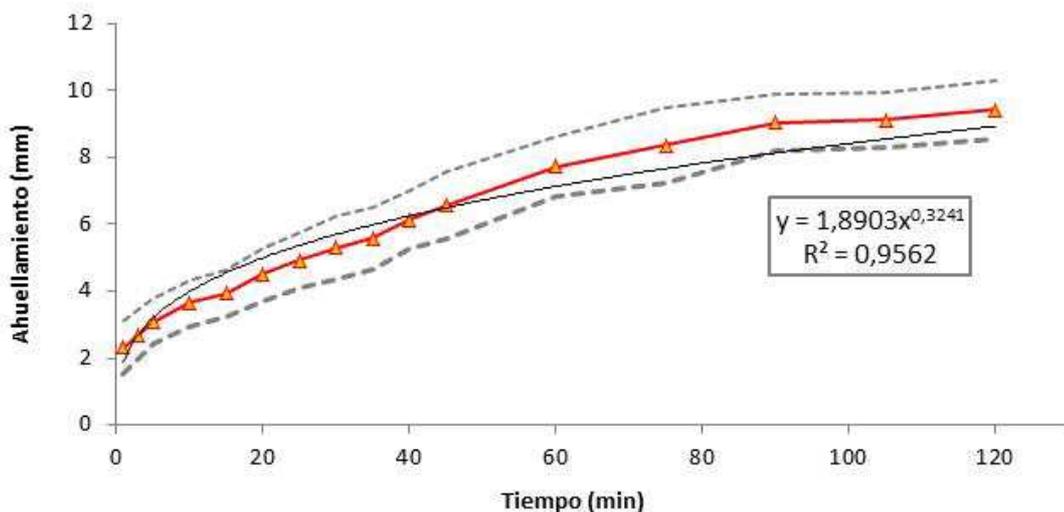


**Figura 34. Ensayo de ahuellamiento para muestra a 0 horas de envejecimiento en PAV.**

Se destaca que se detiene el proceso del ensayo al minuto 75 (Figura 34) teniendo en cuenta que a este tiempo se supera el máximo valor de deformación permanente establecido por la norma definido en 1 pulgada (25.4 mm).

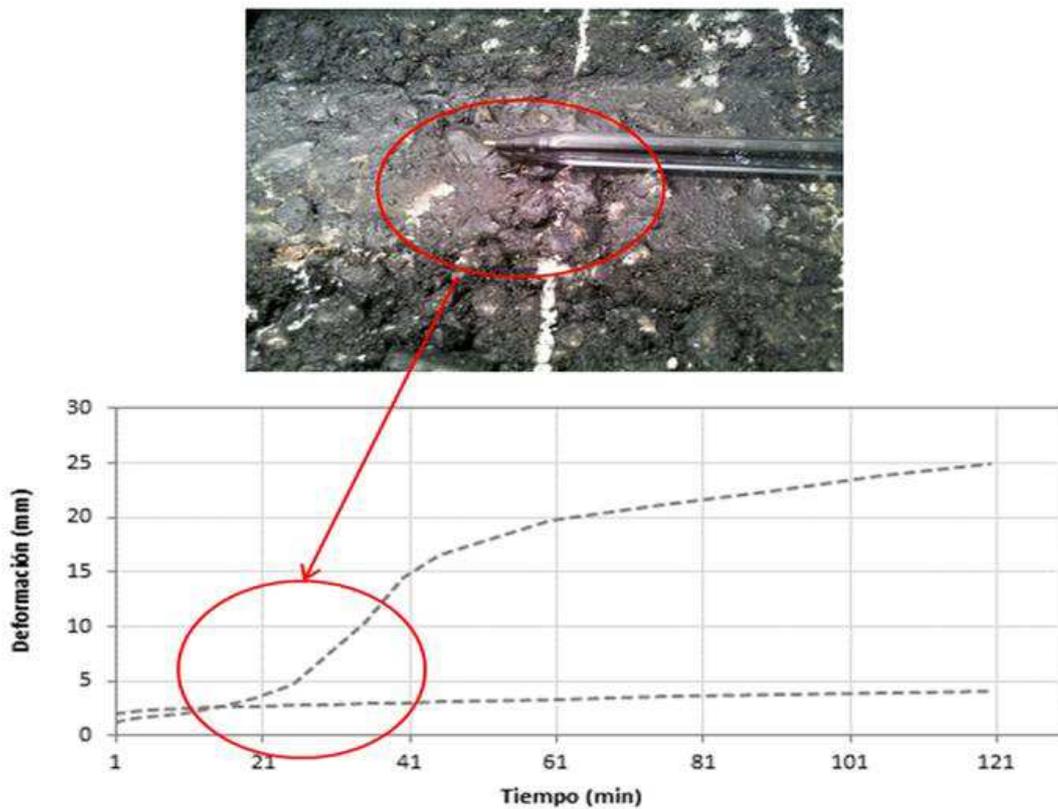


**Figura 35. Ensayo de ahuellamiento para muestra a 5 horas de envejecimiento en PAV.**



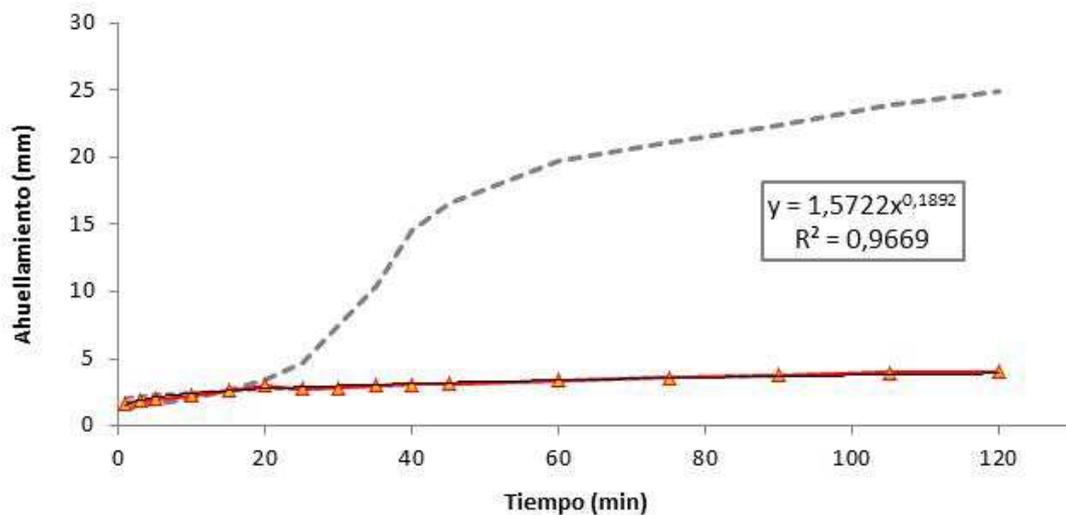
**Figura 36. Ensayo de ahuellamiento para muestra a 20 horas de envejecimiento en PAV.**

Para esta muestra se debe tener en cuenta la tendencia potencial que presenta la curva de ahuellamiento (Figura 36).



**Figura 37. Desprendimiento del agregado para muestra a 50 horas de envejecimiento en PAV.**

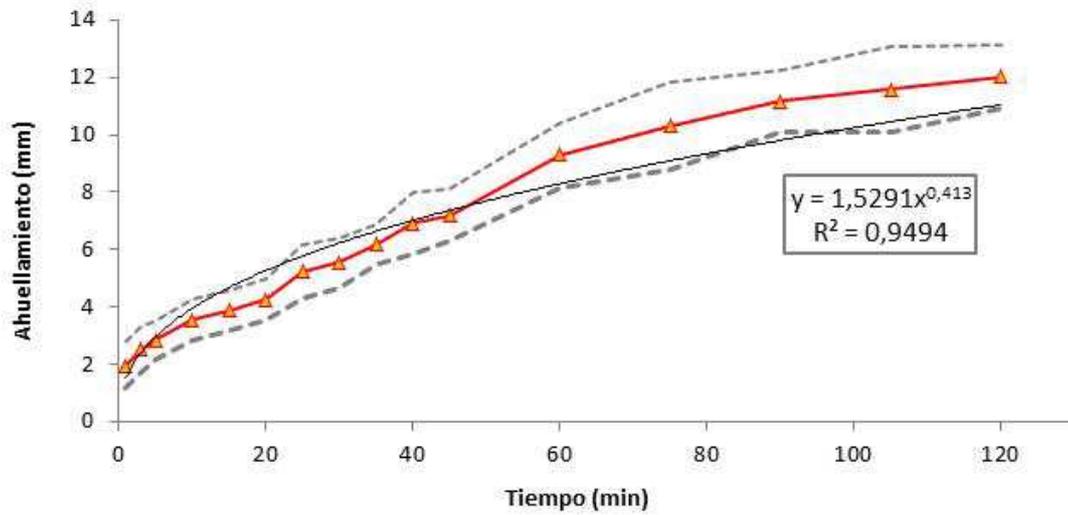
Se recomienda dejar claridad suficiente que entre el minuto 15 y 20 de la panela 1, se empieza a evidenciar un desprendimiento de agregado en la mezcla (Figura 37), lo que incrementa el valor promedio medido en los tres puntos sobre la muestra, no obstante, a estabilizarse este fallo luego del minuto 60, se observa que la pendiente de la curva es similar a la reportada por la Panela 2. Por esta razón, a partir del minuto 25, únicamente se toman los valores promedios reportados de la Panela 2 con base en la variación atípica que presenta la primer muestra (Figura 38).



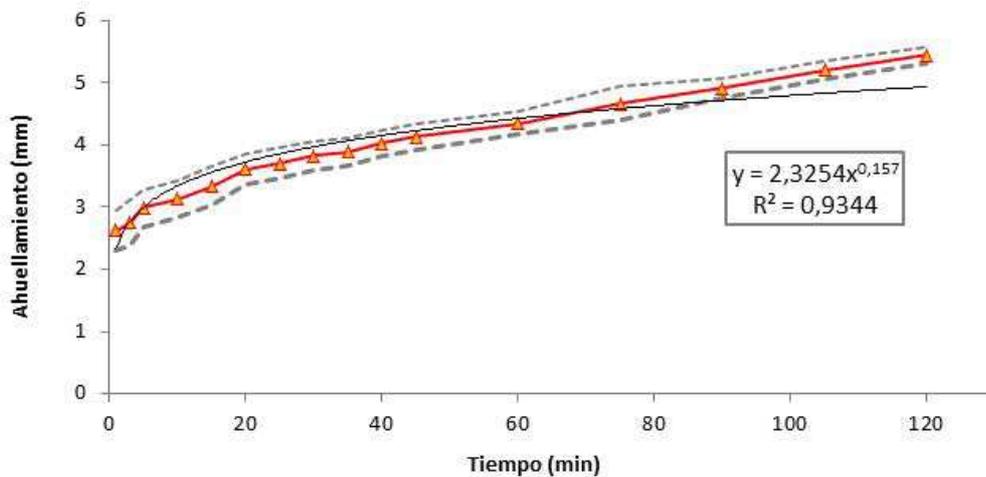
**Figura 38. Ensayo de ahuellamiento para muestra a 50 horas de envejecimiento en PAV.**

### 7.1.2. Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio.

Este tipo de ensayo se realiza para dos (2) tipos de mezclas, con unos periodos de servicio de 8 y 11 años ubicadas en la Calle 153 y Carrera 11 respectivamente; se debe dejar claridad que la panela extraída de la Calle 153 se encontraba sobre la berma de la calzada mientras que para la Carrera 11 se toma de la Cicloruta, los cuales se consideran que no han presentado grandes sollicitaciones de tránsito durante su vida útil. Los resultados presentados a continuación se pueden observar en el **Anexo A** del presente documento.



**Figura 39. Ensayo de ahuellamiento para muestra en servicio, ubicación de toma de muestra: Calle 153.**



**Figura 40. Ensayo de ahuellamiento para muestra de cicloruta, ubicación de toma de muestra: Carrera 11 con Calle 93.**

Teniendo en cuenta las tablas y figuras, en la siguiente tabla se presentan los resultados de los ensayos de ahuellamientos para las muestras de laboratorio y las extraídas en campo.

**Tabla 4. Resumen de Resultados del Ensayo de Ahuellamiento. Mezclas fabricadas en laboratorio.**

Tiempo de Envejecimiento	Ahuellamiento (mm)
0 horas en PAV	27.89
5 horas en PAV	24.34
20 horas en PAV	9.41
50 horas en PAV	4.04

**Tabla 5. Resumen de Resultados del Ensayo de Ahuellamiento. Mezclas extraídas en campo.**

Tiempo de Servicio	Ahuellamiento (mm)
Calle 153 (8 años de servicio)	12.02
Cicloruta (11 años de servicio)	5.45

El análisis de resultados y discusión de los mismos se presenta en el siguiente capítulo (numeral 8), en donde se presentan las correlaciones obtenidas, resultados de curva maestra e indicativos de la relación obtenida del tiempo de envejecimiento en laboratorio mediante la máquina PAV (en horas) y el tiempo de servicio (en años).

## 7.2. FATIGA TRAPEZOIDAL

Como se menciona anteriormente, a continuación se presentan los valores obtenidos del ensayo de fatiga trapezoidal. No obstante, es necesario dejar claridad que las deformaciones establecidas para las mezclas de laboratorio (a 0, 20 y 50 horas de envejecimiento en el equipo PAV) son de 45, 75 y 110  $\mu\text{m}$  mientras que para las mezclas de campo (en servicio) se utilizaron deformaciones reglamentadas de 90, 150 y 220  $\mu\text{m}$ , se ejecutó este ensayo con esta variación de deformaciones debido a que el software del equipo en los primeros ensayos no estaba tomando las deformaciones según norma (90, 150 y 220  $\mu\text{m}$ ) sino que estaba dividiendo estos valores a la mitad (45, 75 y 110  $\mu\text{m}$ ), observándose que los tiempos de duración de los primeros ensayos (a 0, 20 y 50 horas) se demoraron más en llegar a la falla (Tabla 6) que los realizados para las mezclas en servicio (Tabla 7).

**Tabla 6. Tiempo de duración en días hasta la falla (0, 20 y 50 horas).**

Fatiga Trapezoidal (0 horas)			Fatiga Trapezoidal (20 horas)		
DEFORMACIÓN $\mu\text{m}$	Número de ciclos hasta la falla	Tiempo duración hasta la falla (Días)	DEFORMACIÓN $\mu\text{m}$	Número de ciclos hasta la falla	Tiempo duración hasta la falla (Días)
45	11.234.534	<b>13,00</b>	45	72.885.655	<b>84,36</b>
	11.564.289	<b>13,38</b>		71.592.848	<b>82,86</b>
	10.674.329	<b>12,35</b>		64.269.216	<b>74,39</b>
	12.545.765	<b>14,52</b>		100.355.528	<b>116,15</b>
75	3.765.876	<b>4,36</b>	75	2.787.317	<b>3,23</b>
	2.956.432	<b>3,42</b>		6.603.539	<b>7,64</b>
	2.476.349	<b>2,87</b>		3.108.518	<b>3,60</b>
	3.257.689	<b>3,77</b>		8.086.306	<b>9,36</b>
110	408.943	<b>0,47</b>	110	703.238	<b>0,81</b>
	294.056	<b>0,34</b>		599.291	<b>0,69</b>
	323.535	<b>0,37</b>		457.491	<b>0,53</b>
	356.294	<b>0,41</b>		725.136	<b>0,84</b>

<b>Fatiga Trapezoidal (50 horas)</b>		
DEFORMACIÓN	Número de ciclos	Tiempo duración
$\mu\text{m}$	hasta la falla	hasta la falla (Días)
45	115.522.585	<b>133,71</b>
	93.862.414	<b>108,64</b>
	102.466.296	<b>118,60</b>
	151.963.719	<b>175,88</b>
75	5.605.019	<b>6,49</b>
	7.007.313	<b>8,11</b>
	10.097.338	<b>11,69</b>
	4.500.966	<b>5,21</b>
110	660.668	<b>0,76</b>
	590.176	<b>0,68</b>
	702.210	<b>0,81</b>
	969.057	<b>1,12</b>

**Tabla 7. Tiempo de duración en días hasta la falla (Calle 153 y Cicloruta).**

<b>Fatiga Trapezoidal (Calle 153)</b>			<b>Fatiga Trapezoidal (Cicloruta)</b>		
DEFORMACIÓN	Número de ciclos	Tiempo duración	DEFORMACIÓN	Número de ciclos	Tiempo duración
$\mu\text{m}$	hasta la falla	hasta la falla (Días)	$\mu\text{m}$	hasta la falla	hasta la falla (Días)
90	4.102.502	<b>4,75</b>	90	6.730.866	<b>7,79</b>
	3.677.460	<b>4,26</b>		6.820.742	<b>7,89</b>
	6.599.680	<b>7,64</b>		4.422.605	<b>5,12</b>
	4.748.227	<b>5,50</b>		5.831.169	<b>6,75</b>
	271.751	<b>0,31</b>		279.240	<b>0,32</b>
150	698.729	<b>0,81</b>	150	432.139	<b>0,50</b>
	808.119	<b>0,94</b>		301.835	<b>0,35</b>
	304.156	<b>0,35</b>		144.460	<b>0,17</b>
	43.199	<b>0,05</b>		28.687	<b>0,03</b>
220	33.089	<b>0,04</b>	220	53.973	<b>0,06</b>
	27.753	<b>0,03</b>		41.454	<b>0,05</b>
	42.739	<b>0,05</b>		59.821	<b>0,07</b>

De las figuras obtenidas para las leyes de fatiga, se recomienda reportar para los análisis mecanicistas y diseños racionales de pavimentos, dos parámetros esenciales denominados como la pendiente de fatiga “*b*” y la deformación a un millón de repeticiones “ $\epsilon_6$ ”, los cuales indican una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga.

### 7.2.1. Mezcla Asfáltica a 0 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.

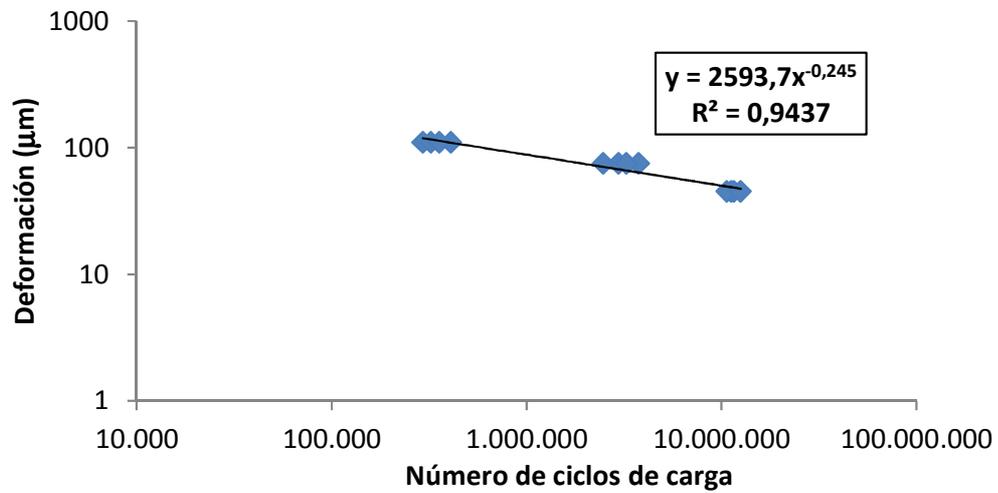
Se deja claridad que estos datos son tomados directamente de la Tesis de Maestría, Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión. Ing. Jonathan Vera Silva (2012).

**Tabla 8. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra envejecida a 0 horas en PAV.**

Datos Tesis Vera, 2012 – PUJ		
DEFORMACIÓN $\mu\text{m}$	Número de Briqueta	Número de ciclos hasta la falla
45	1	11,234,534
	2	11,564,289
	3	10,674,329
	4	12,545,765
75	1	3,765,876
	2	2,956,432
	3	2,476,349
	4	3,257,689
110	1	408,943
	2	294,056
	3	323,535
	4	356,294

En función de la tabla anterior, se tiene valores de  $b$  igual  $-0.245$  y una deformación a un millón de ciclos de carga  $\epsilon_6$  de  $87.89$ .

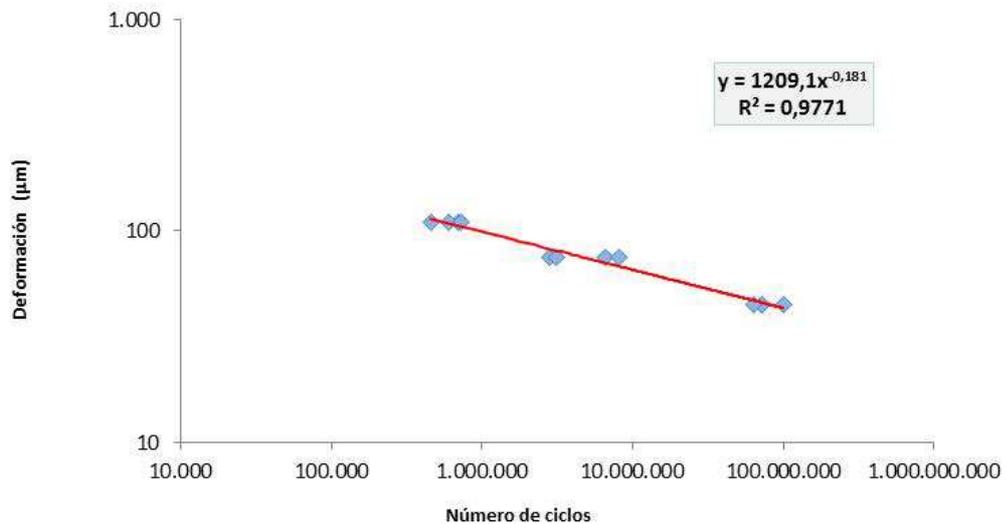
PARÁMETROS	
$\epsilon_6$	87.89
$b$	-0.245
$\alpha$	4.082



**Figura 41. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra envejecida a 0 horas en PAV.**

Debido a que se tomo la temperatura ambiente promedio de la ciudad de Bogotá (13°C - 15°C) y no se realizó factor de corrección de temperatura se observa una dispersión de los valores obtenidos.

**7.2.2. Mezcla asfáltica a 20 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.**

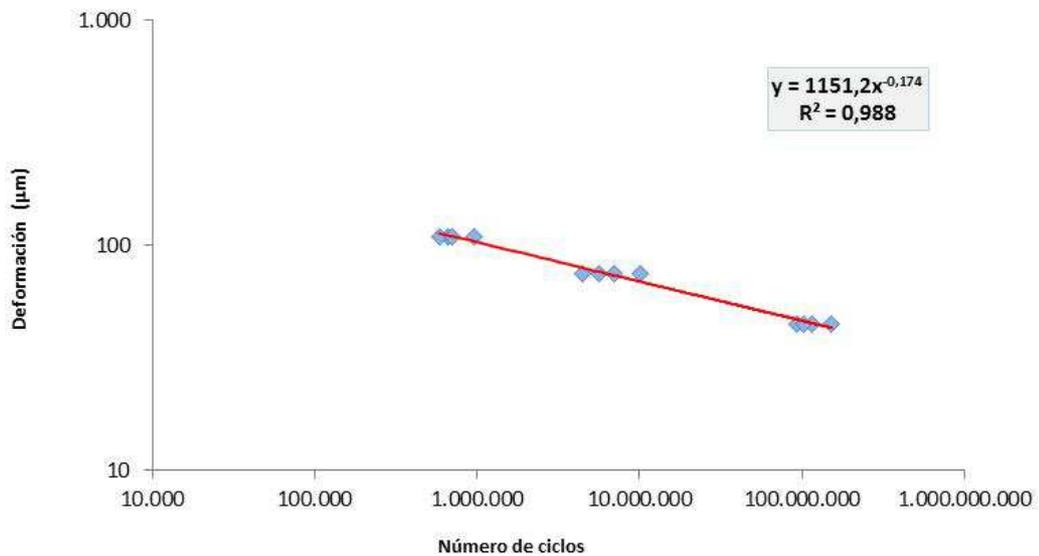


**Figura 42. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra envejecida a 20 horas en PAV.**

En función de lo anterior, se tiene valores de b igual -0.181 y una deformación a un millón de ciclos de carga  $\epsilon_6$  de 99.19.

PARÁMETROS	
$\epsilon_6$	99.19
b	-0.181
$\alpha$	5.52

### 7.2.3. Mezcla asfáltica a 50 horas de envejecimiento en PAV, MDC-2.

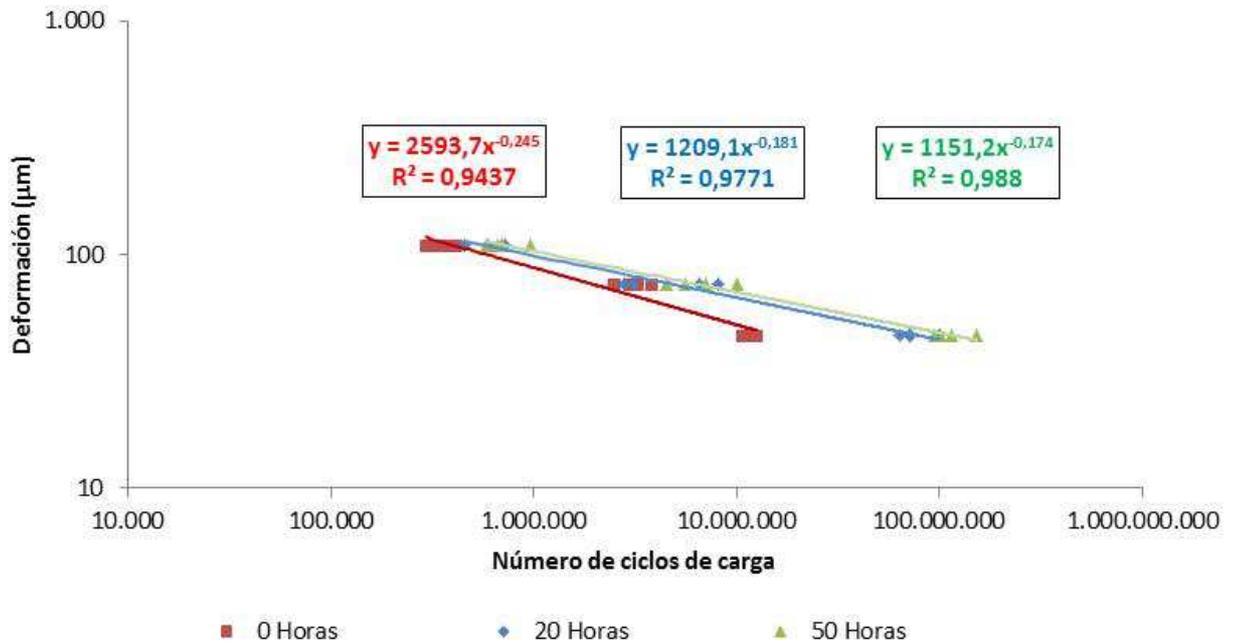


**Figura 43. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra envejecida a 50 horas en PAV.**

En función de lo anterior, se tiene valores de b igual -0.174 y una deformación a un millón de ciclos de carga  $\epsilon_6$  de 104.03.

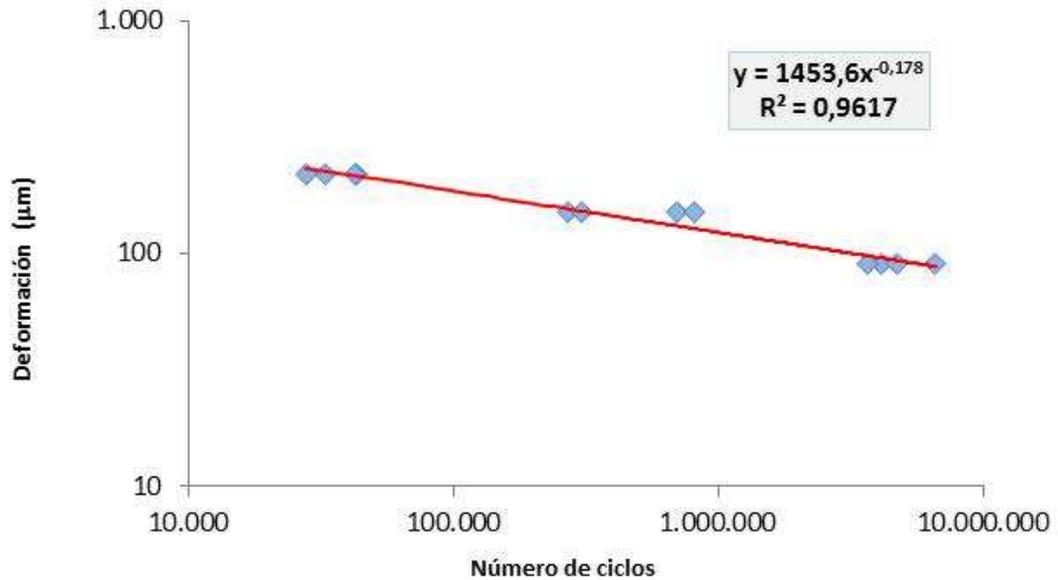
PARÁMETROS	
$\epsilon_6$	104.03
b	-0.174
$\alpha$	5.75

Teniendo en cuenta los tres (3) ensayos ejecutados para mezclas envejecidas en laboratorio mediante el equipo de PAV a 20 horas y 50 horas, adicionalmente se presenta la curva obtenida para una mezcla asfáltica MDC-2 sin envejecer.



**Figura 44. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra fabricadas en laboratorio.**

**7.2.4. Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio. Calle 153.**

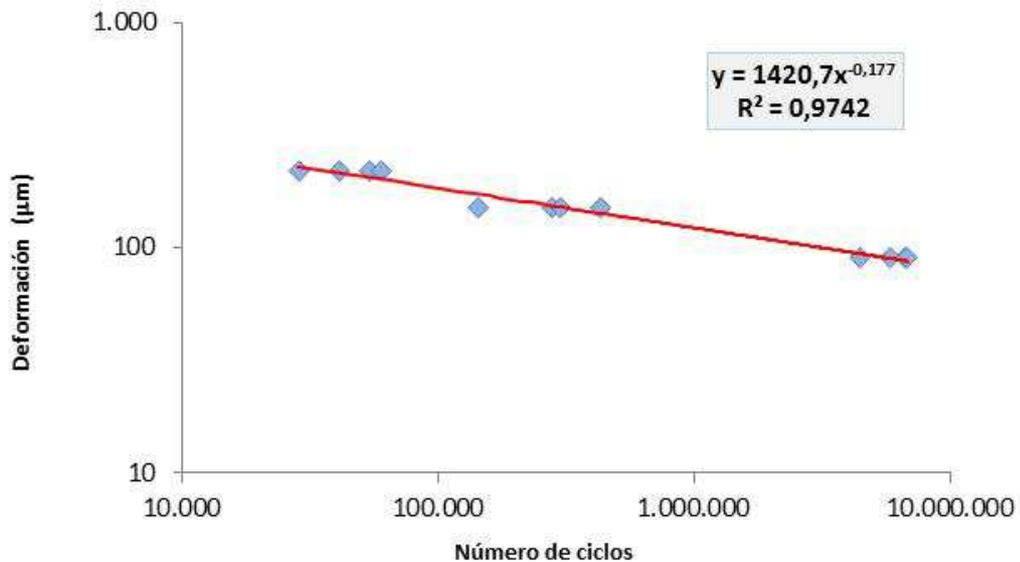


**Figura 45. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra en servicio, ubicación de toma de muestra: Calle 153.**

En función de lo anterior, se tiene valores de  $b$  igual  $-0.178$  y una deformación a un millón de ciclos de carga  $\epsilon_6$  de  $124.29$ .

PARÁMETROS	
$\epsilon_6$	124.29
$b$	-0.178
$\alpha$	5.62

**7.2.5. Envejecimiento del Asfalto Naturalmente, Muestras en Servicio. Cicloruta sobre la Carrea 11.**

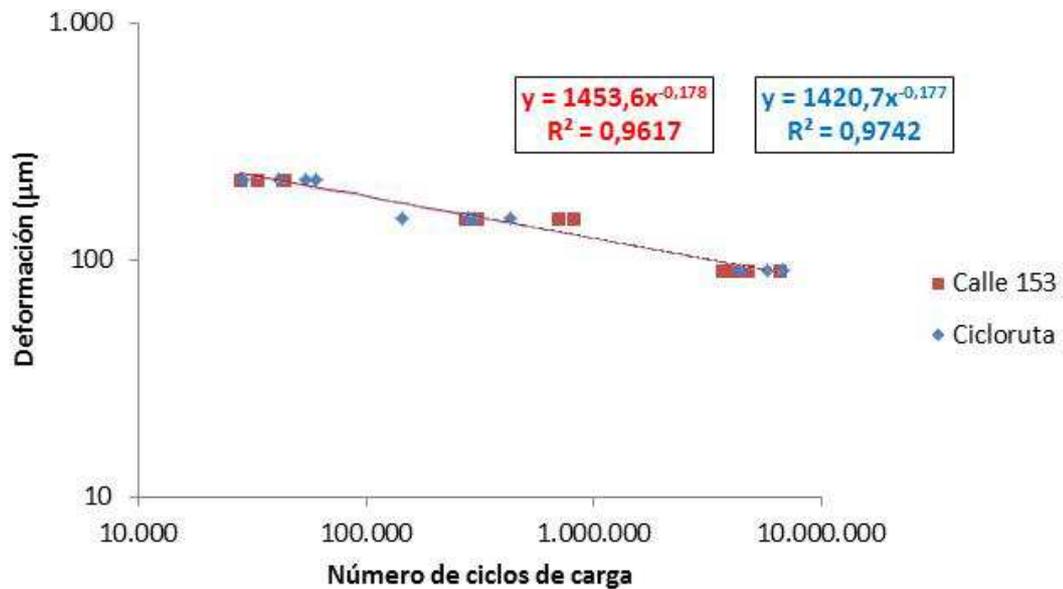


**Figura 46. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra de cicloruta, ubicación de toma de muestra: Carrera 11 con Calle 93.**

En función de la tabla anterior, se tiene valores de b igual -0.177 y una deformación a un millón de ciclos de carga  $\epsilon_6$  de 123.17.

PARÁMETROS	
$\epsilon_6$	123.17
b	-0.177
$\alpha$	5.65

Una vez obtenida las leyes de fatiga para las muestras en servicio, se debe observar que éstas no presentan gran variaciones en sus valores de pendiente de donde se tienen valores de -0.178 y -0.177 para la mezcla extraída de la Calle 153 y la Carrera 11 (cicloruta) respectivamente.



**Figura 47. Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal para muestra en servicio.**

En función de lo definido en este acápite, en la siguiente tabla se presentan los valores resumen de los datos obtenidos en laboratorio de las leyes de fatiga y sus parámetros establecidos para el diseño racional de pavimentos.

**Tabla 9. Resumen de Resultados del Ensayo de Fatiga Trapezoidal.**

Mezclas evaluadas	Resultados de Fatiga NFP-98-261		
	$b$	$\alpha$	$\epsilon_6$ (µm)
0 Horas en PAV	-0.245	4.082	87.89
20 Horas en PAV	-0.181	5.525	99.19
50 Horas en PAV	-0.174	5.747	104.03
Calle 153 (8 años de servicio)	-0.178	5.618	124.29
Cicloruta (11 años de servicio)	-0.177	5.650	123.95

El análisis de resultados y discusión de los mismos se presenta en el siguiente capítulo (numeral 8), en donde se presentan los resultados para la obtención de la curva maestra e indicativos de la relación obtenida del tiempo de envejecimiento en laboratorio mediante la máquina PAV (en horas) y el tiempo de servicio (en años).

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La segunda etapa u objetivo de esta investigación consiste en evaluar la variación en las propiedades mecánicas que presentan las mezclas asfálticas en caliente del tipo MDC-2 para diferentes etapas de envejecimiento en servicio y en laboratorio, para lo cual se observa que las mezclas fabricadas y extraídas en campo aumentan su resistencia a la deformación permanente con el tiempo, lo que se atribuye principalmente a fenómenos de envejecimiento por factores climáticos.

**Tabla 10. Resultados de valores de deformación permanente para mezclas envejecidas en laboratorio.**

Tiempo de Envejecimiento	Ahuellamiento (mm)
0 horas en PAV	27.89
5 horas en PAV	24.34
20 horas en PAV	9.41
50 horas en PAV	4.04

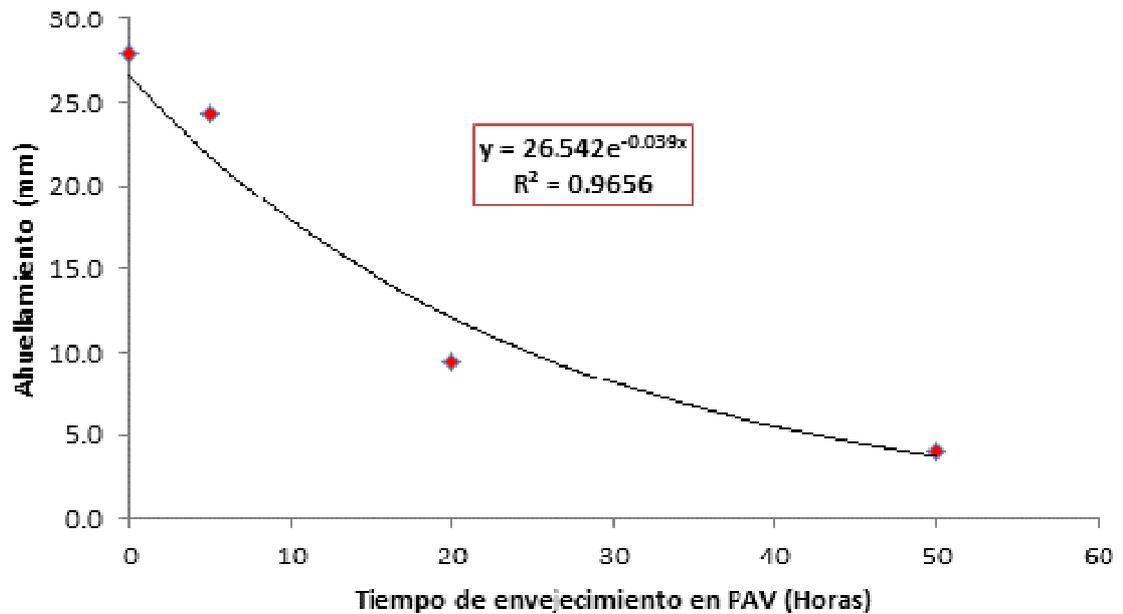
Los resultados pueden estar atribuidos a los valores del módulo  $G^*$  los cuales aumentan a medida que transcurre el tiempo de envejecimiento en años (reporte de resultados obtenidos por Parada, Lepesqueur y Caicedo, 2009) y representan una alta resistencia a la deformación (Bahia y Anderson, 1995).

**Tabla 11. Resultados de valores de deformación permanente para mezclas envejecidas naturalmente (en servicio).**

Tiempo de Servicio	Ahuellamiento (mm)
Calle 153 (8 años de servicio)	12.02
Cicloruta (11 años de servicio)	5.45

Con base en las tablas de resultados obtenidos para mezclas en laboratorio con un tiempo de envejecimiento en la máquina del PAV, se presenta la siguiente función que

correlaciona una variable dependiente en el eje “y” establecida como la deformación permanente (Ahuellamiento, en mm) y una variable independiente en el eje “x” definida como las horas de envejecimiento a largo plazo.



**Figura 48. Obtención de curva maestra en función del tiempo de envejecimiento y el ahuellamiento vertical.**

En función de lo anterior, se establece que los efectos del envejecimiento a largo plazo son el incremento de la viscosidad y la rigidez de la mezcla asfáltica (Fernández, Rondón y Reyes, 2011). Rondón, Reyes y Vacca (2010) encuentran que existe una correlación directa entre el Módulo de Rigidez de la mezcla y su resistencia al ahuellamiento, donde a medida que aumenta el valor de E existe un decremento en el porcentaje de deformación permanente (ahuellamiento).

Así las cosas, es posible relacionar el ahuellamiento vertical obtenido en las mezclas de campo para obtener, en función de los años de servicio, el tiempo de envejecimiento en PAV (en horas) ajustada a la función de tipo exponencial obtenida por regresión de la Figura anterior. En este sentido, para un periodo de servicio de 8 años (mezcla extraída

de la Calle 153) y 11 años (mezcla extraída de la Carrera 11, cicloruta) se tiene un tiempo de envejecimiento en laboratorio utilizando el equipo PAV de 20.3 y 40.6 horas correspondientemente.

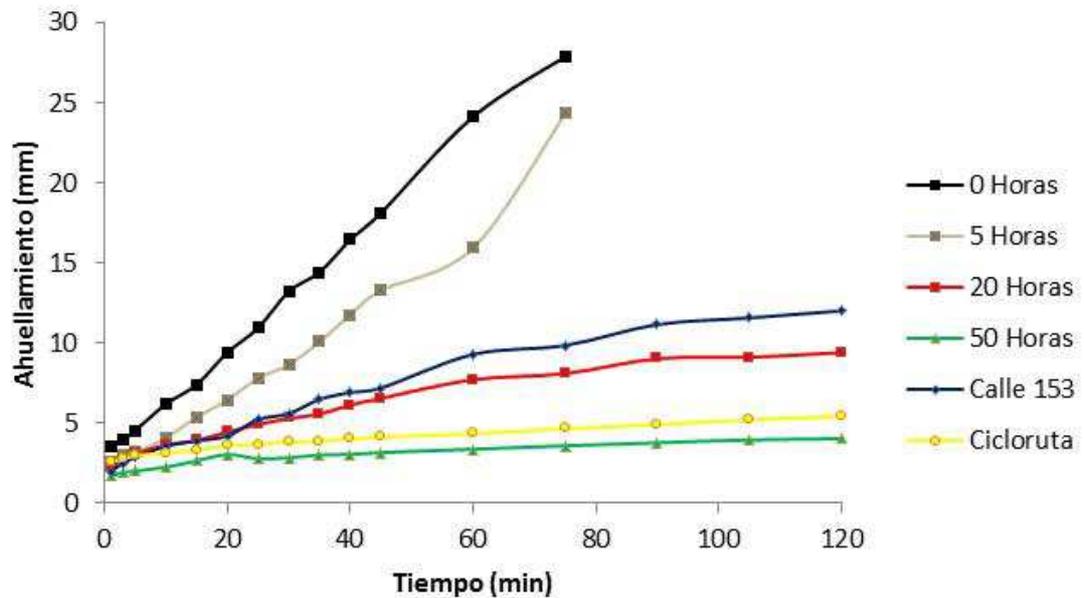
**Tabla 12. Relación de la deformación vertical obtenida de mezclas en servicio y el tiempo de envejecimiento en PAV.**

Tiempo de Servicio	Ahuellamiento (mm)	Tiempo de Envejecimiento en PAV en horas (por regresión)
Calle 153 (8 años de servicio)	12.02	<b>20.3</b>
Cicloruta (11 años de servicio)	5.45	<b>40.6</b>

Con base en lo anterior y teniendo en cuenta únicamente los valores obtenidos del ensayo de ahuellamiento según normativa INV-E-756-07, acelerar el proceso de envejecimiento por medio del equipo P.A.V a 20 horas simula un envejecimiento natural de 8 años en servicio de la mezcla asfáltica.

Lo mencionado en la viñeta anterior, se puede apreciar en la siguiente figura, donde se grafica el desarrollo de cada ensayo de ahuellamiento para cada mezcla analizada, en ella se incluyen tanto las mezclas elaboradas (y envejecidas) en laboratorio y las muestras que se encontraban en servicio (envejecidas naturalmente).

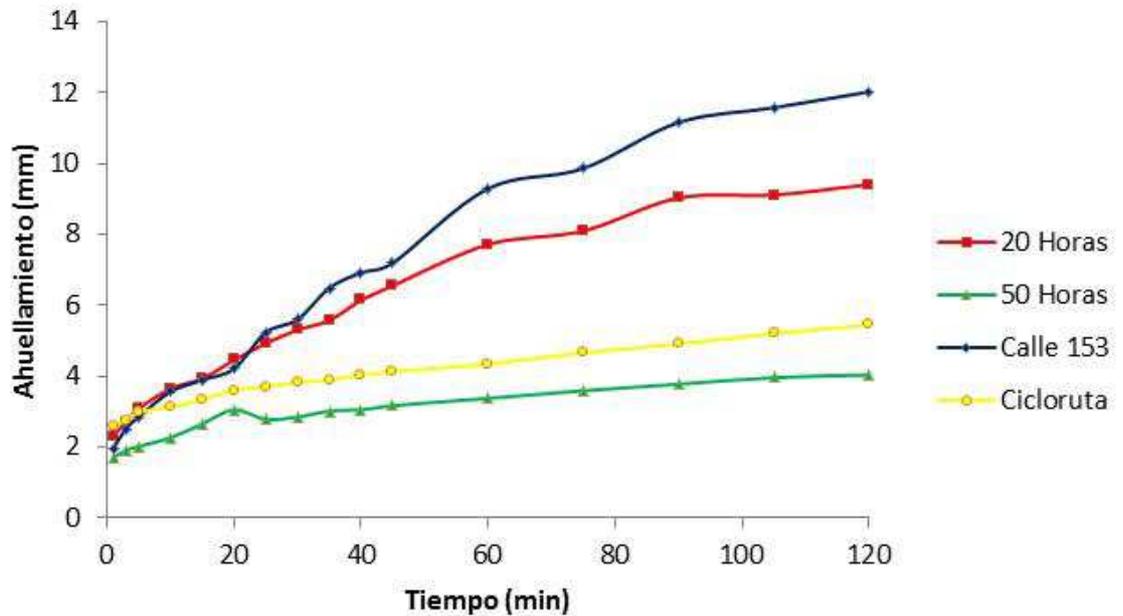
Se resalta que las muestras presentan un comportamiento que está en función del módulo resiliente, entre mayor es el módulo (más horas de envejecido) menor es la deformación vertical medida, lo que soporta lo establecido en diversas investigaciones donde se menciona que el módulo de la carpeta asfáltica aumenta con un periodo de envejecimiento inicial.



**Figura 49. Resultados del ensayo de ahuellamiento para mezclas envejecidas en laboratorio y naturalmente (en servicio).**

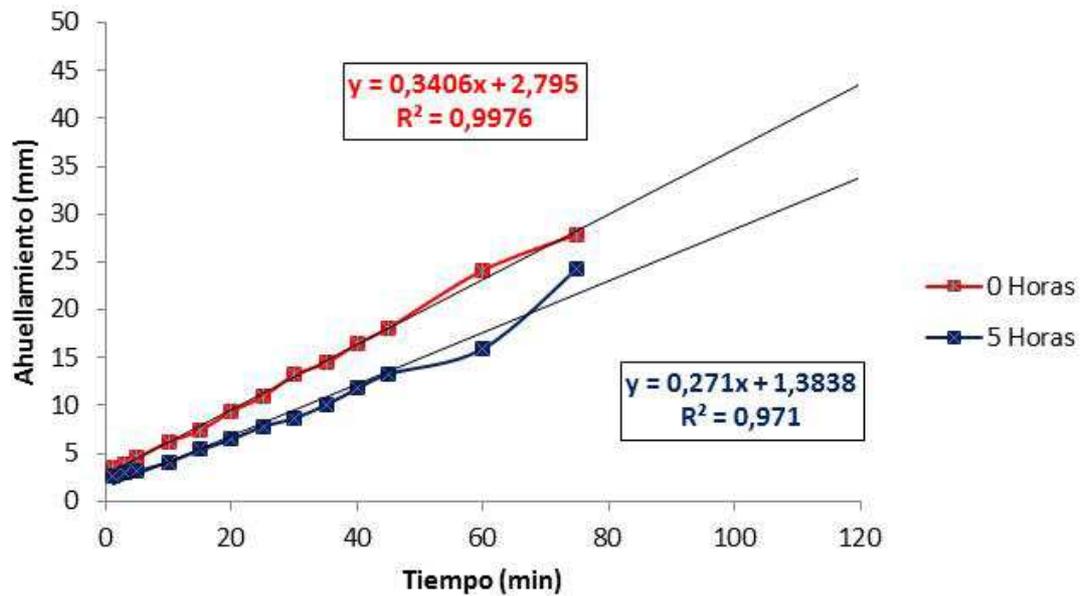
Esta gráfica es similar a la obtenida en el estudio desarrollado por Reyes, O y Camacho J (2008) donde se menciona que el desempeño por ahuellamiento disminuye con el tiempo envejecimiento a largo plazo (ver Figura 19). Durante los ciclos de carga inicial, la deformación vertical es alta y a continuación, se vuelve casi constante, este desarrollo se observa para las panelas de 20 y 50 horas de envejecimiento y para las mezclas en servicio de la Calle 153 y la Carrera 11 (Cicloruta). Sin embargo, la deformación es menor en las mezclas de edad que en los originales.

De manera particular, se destaca la similitud que presenta la curva de ahuellamiento de la Calle 153 (con un periodo de servicio de 8 años) y el envejecimiento en PAV a 20 horas. Mientras que para un envejecimiento en PAV de 50 horas, la cicloruta es la que más se acerca a la deformación vertical última medida.



**Figura 50. Resultados del ensayo de ahuellamiento para mezclas envejecidas en PAV de 20 y 50 horas, y mezclas extraídas de campo.**

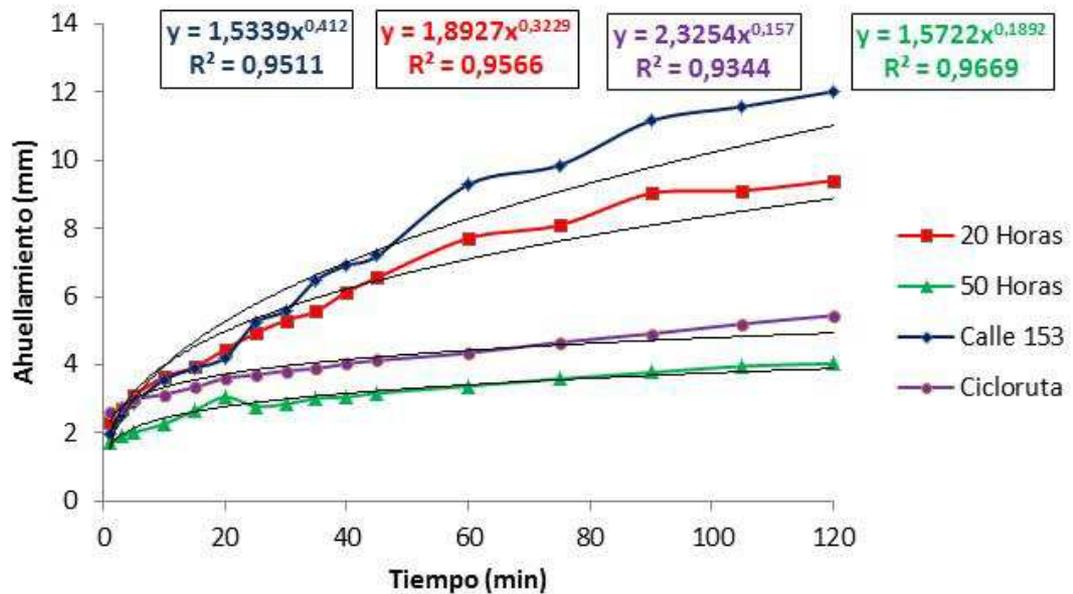
Las panelas preparadas con asfalto envejecido a 0 y 5 horas en PAV presentaron falla por ahuellamiento (deformación máxima de 1 pulgada según norma) a los 75 minutos de la prueba. El tiempo de falla será representado en número de ejes equivalente de falla. Adicionalmente, para este tipo de muestras, se presenta un comportamiento lineal representado con pendiente de 0.3406 y 0.271 e intersección con el eje de las ordenadas de 2.795 y 1.3838 para 0 horas y 5 horas respectivamente.



**Figura 51. Comportamiento lineal para mezclas envejecidas en PAV a 0 y 5 horas.**

Siguiendo la idea anterior, se observa un comportamiento diferente para mezclas envejecidas en mayor tiempo, donde para edades de 20, 50 horas y, 8 y 11 años de servicio (Calle 153 y Cicloruta-Carrera 11) se observa un crecimiento potencial tendiendo a permanecer constante después de los primeros 20 minutos de inicio del ensayo.

En este contexto, el envejecimiento oxidativo ejerce una gran influencia en las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico reflejado en el incremento del módulo elástico  $G^*$ , resultado del aumento de las interacciones moleculares del asfalto como: fuerzas dispersivas, puentes de hidrógeno e interacciones polares, especialmente de los asfaltenos, que en conjunto resultan en una mayor estructuración del asfalto o un incremento en la conectividad de las moléculas del material (Reyes y Rondón, 2009).



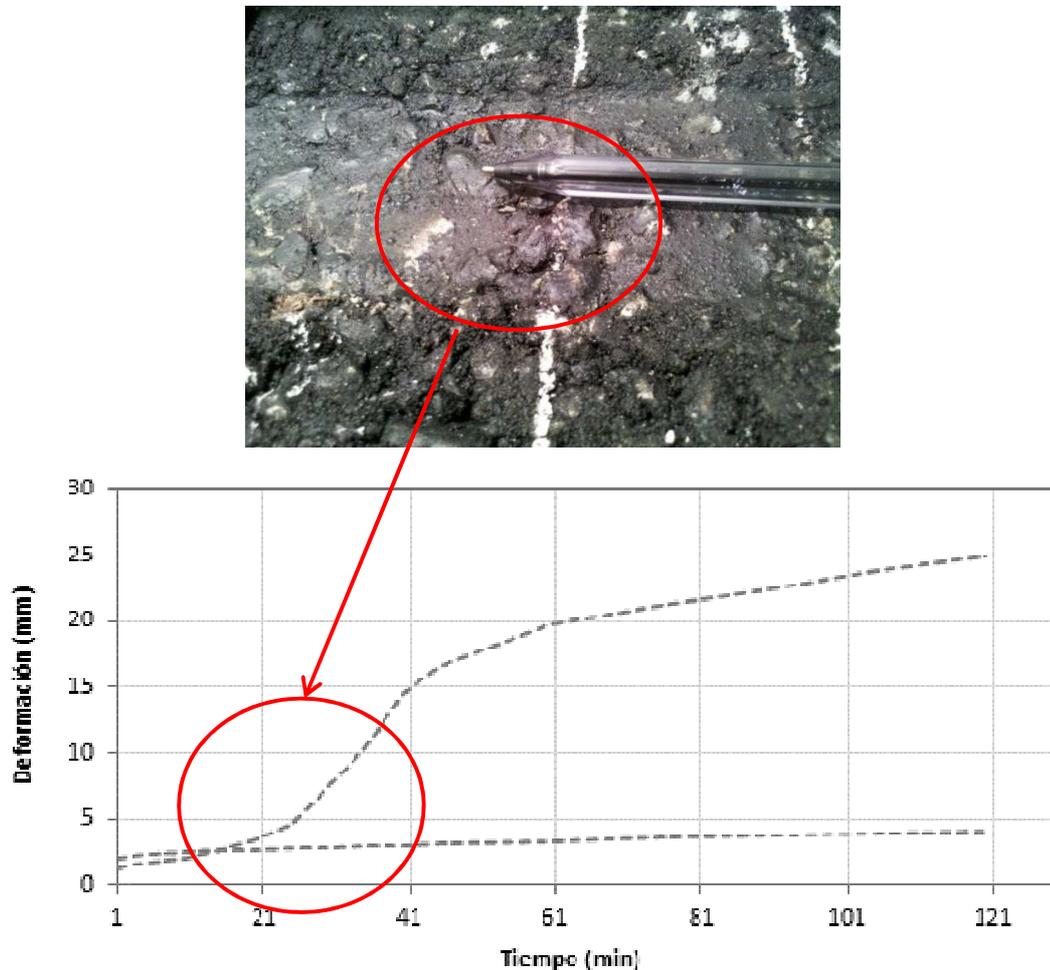
**Figura 52. Comportamiento potencial para mezclas envejecidas en PAV a 20 y 50 horas, y mezclas extraídas en campo.**

Se resalta que el desempeño por ahuellamiento disminuye con el tiempo envejecimiento a largo plazo (Reyes y Camacho, 2008). Durante los ciclos de carga inicial, la deformación vertical es alta y a continuación, se vuelve casi constante.

Por otra parte, para un alto estado de envejecimiento, representado por 50 horas en PAV, se tiene una alta resistencia al ahuellamiento inicialmente, pero a partir de los 15-25 minutos (puntos de inflexión) se observa desprendimiento de material fino con diámetros menores a 4.75 mm (Tamiz No. 4). Establecido por una aumento excesivo de rigidez, pérdida del ligante asfáltico y por ende la aparición de macro fisuras en la mezcla (Ver siguiente figura).

El proceso de envejecimiento reflejado en esta muestra se traduce en la definición establecida por Reyes y Vargas (2009) en donde a los asfaltos se les altera las propiedades físico-químicas del material con el envejecimiento y por ende la durabilidad de los pavimentos asfálticos, ocasionando pérdidas del ligante, que para

mezclas en servicio conducen a pérdidas económicas debido a deterioros prematuros de las carpetas asfálticas.



**Figura 53. Desprendimiento observado durante el ensayo de ahuellamiento para una mezcla con asfalto envejecido a 50 horas en PAV.**

Tal y como se menciona anteriormente, a partir del minuto 15 de la panela 1, se empieza a evidenciar un desprendimiento de agregado en la mezcla, lo que incrementa el valor promedio medido en los tres puntos de referencia sobre la muestra, no obstante, a estabilizarse este fallo luego del minuto 60, se observa que la pendiente de la curva es similar a la reportada por la Panela 2. Por esta razón, a partir del minuto 25, únicamente

se toman los valores promedios reportados de la Panela 2 con base en la variación atípica que presenta la primer muestra.

Otro parámetro mecánico evaluado consiste en evaluar la resistencia a la fatiga por medio del ensayo Francés (Fatiga Trapezoidal) de donde se observa una disminución en la pendiente de la curva “*b*” con el tiempo de exposición en servicio y en laboratorio en la máquina PAV.

**Tabla 13. Resultados de valores del ensayo de Fatiga para mezclas evaluadas.**

Mezclas evaluadas	Resultados de Fatiga NFP-98-261		
	<i>b</i>	$\alpha$	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{m}$ )
0 Horas en PAV*	-0.245	4.082	87.89
20 Horas en PAV	-0.181	5.525	99.19
50 Horas en PAV	-0.174	5.747	104.03
Calle 153 (8 años de servicio)	-0.178	5.618	124.29
Cicloruta (11 años de servicio)	-0.177	5.650	123.95

\*Valores tomados de la Tesis “Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión” desarrollada por Vera, Jonathan. PUJ. 2012.

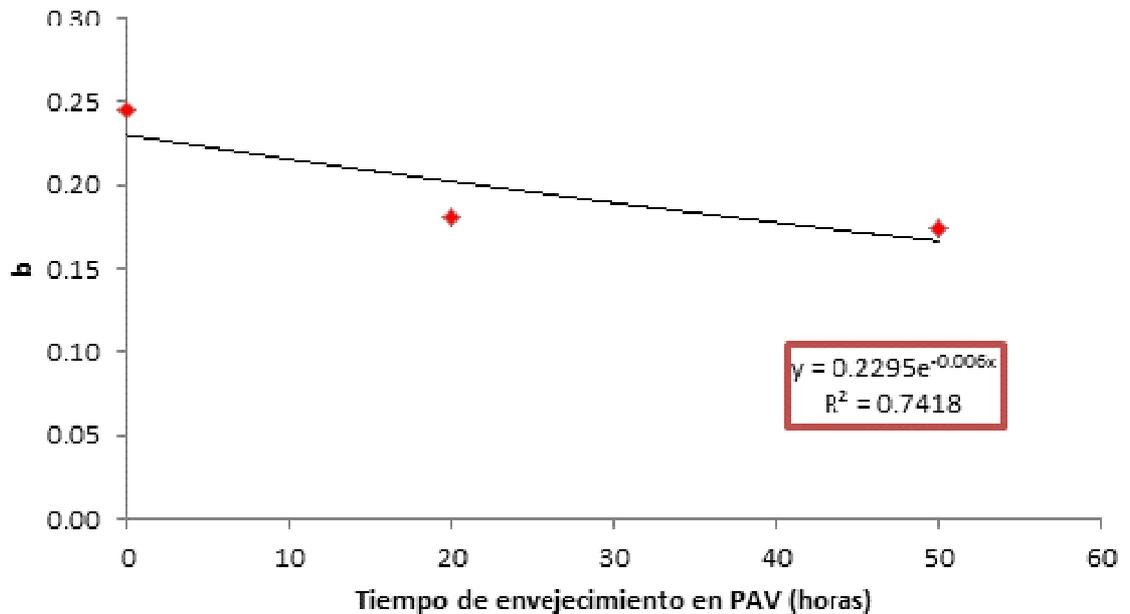
Algunos investigadores como Harvey y Tsai (1997) reportan que un incremento en la rigidez de mezclas asfálticas como producto del envejecimiento en laboratorio del ligante asfáltico no necesariamente reduce la vida de fatiga de mezclas, mientras que otros como Schmidt y Santucci (1969), Raad, Saboundjian y Minassian (2001) y Walubita (2005) reportan lo contrario.

En función de la tabla anterior y con base en las mezclas envejecidas en laboratorio, se presenta la siguiente correlación de tipo exponencial donde se relaciona la pendiente de la ley de fatiga “*b*” y el tiempo de envejecimiento en horas en PAV.

Esta ecuación tiene la forma:

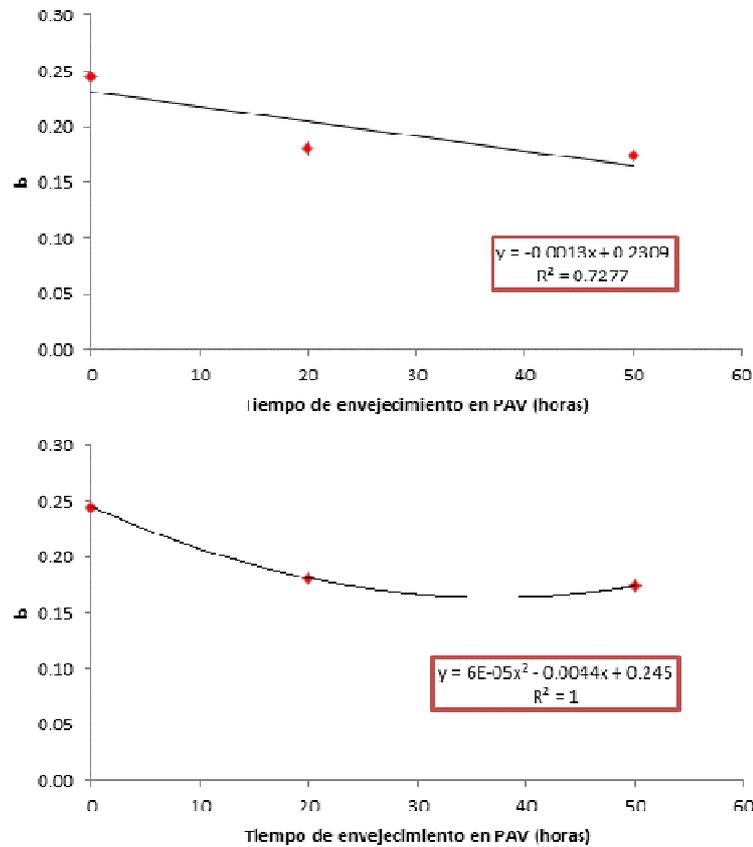
$$b = A * e^{B \cdot x}$$

Donde los valores de las variables obtenidos por regresión lineal de A es de 0.2295 y B igual a -0.006.



**Figura 54. Obtención de curva maestra en función del tiempo de envejecimiento y la pendiente de la ley de fatiga *b*.**

Se debe dejar claro que es posible obtener una curva del tipo polinomial de orden 1 y 2, sin embargo, para el primer caso se tiene una correlación menor a la obtenida por la ecuación exponencial de  $R^2$  igual a 0.72, y una regresión polinomial de grado 2 presenta una correlación exacta de  $R^2$  igual 1; No obstante, se debe tener en cuenta que se tienen tres puntos de referencia y la ecuación cuadrática presenta un punto de inflexión cercano a 35 horas en PAV, lo que conlleva a definir que a partir de este periodo de tiempo, la pendiente de la ley de fatiga tiende a aumentar, por lo cual y según literatura técnica, el módulo de la mezcla asfáltica (cuya relación es inversamente proporcional a *b*) tendería a disminuir; lo anterior no se ha evidenciado en investigaciones previas y lo establecido durante el desarrollo de este Documento.



**Figura 55. Ecuaciones de Correlaciones de la curva de fatiga no recomendadas.**

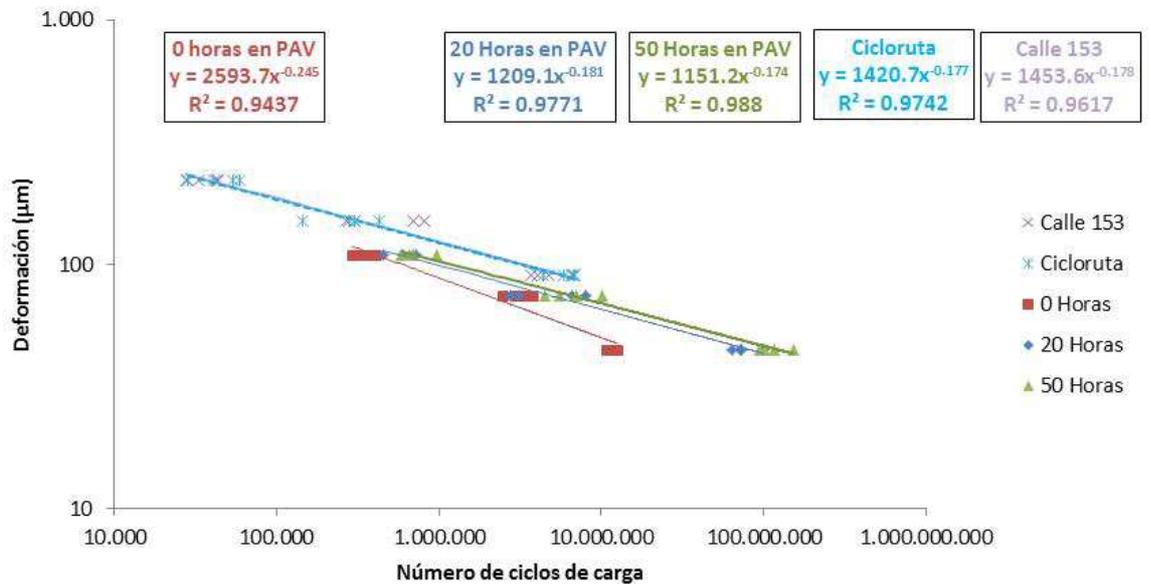
En consecuencia de lo anterior, se puede establecer una relación siguiendo la metodología establecida en el ensayo de ahuellamiento, en donde a partir de la ecuación recomendada, se puede establecer una relación entre el tiempo de envejecimiento naturalmente (empleando el valor de la pendiente de la ley de fatiga) y el tiempo de envejecimiento en laboratorio utilizando la cámara de presión PAV. Así las cosas, teniendo en cuenta el criterio único de “b” se tiene que para un periodo de servicio de 8 años, equivale a un envejecimiento acelerado a corto plazo de 42 Horas.

**Tabla 14. Relación entre el tiempo de envejecimiento en PAV y la pendiente de la ley de fatiga  $b$ .**

Mezclas evaluadas	Resultados de Fatiga NFP-98-261		Tiempo de Envejecimiento en PAV en horas (por regresión) [En función de $b$ ]
	$b$	$\epsilon_6$ ( $\mu\text{m}$ )	
0 Horas en PAV*	-0.245	87.89	
20 Horas en PAV	-0.181	99.19	
50 Horas en PAV	-0.174	104.03	
Calle 153 (8 años de servicio)	-0.178	124.29	<b>42.4</b>
Cicloruta (11 años de servicio)	-0.177	123.95	<b>43.3</b>

Lo que se reporta con claridad en la literatura de referencia para los estudios de fatiga bajo deformación controlada es que un incremento en la rigidez redundante en una disminución de la vida de fatiga de las mezclas. Por lo tanto, según lo presentado por Reyes, Rondón y Vacca (2010), si una mezcla envejece, se rigidiza, disminuyendo su resistencia al fenómeno de fatiga por este efecto, y además esta disminución se acentúa debido a la tendencia de la mezcla a fragilizarse.

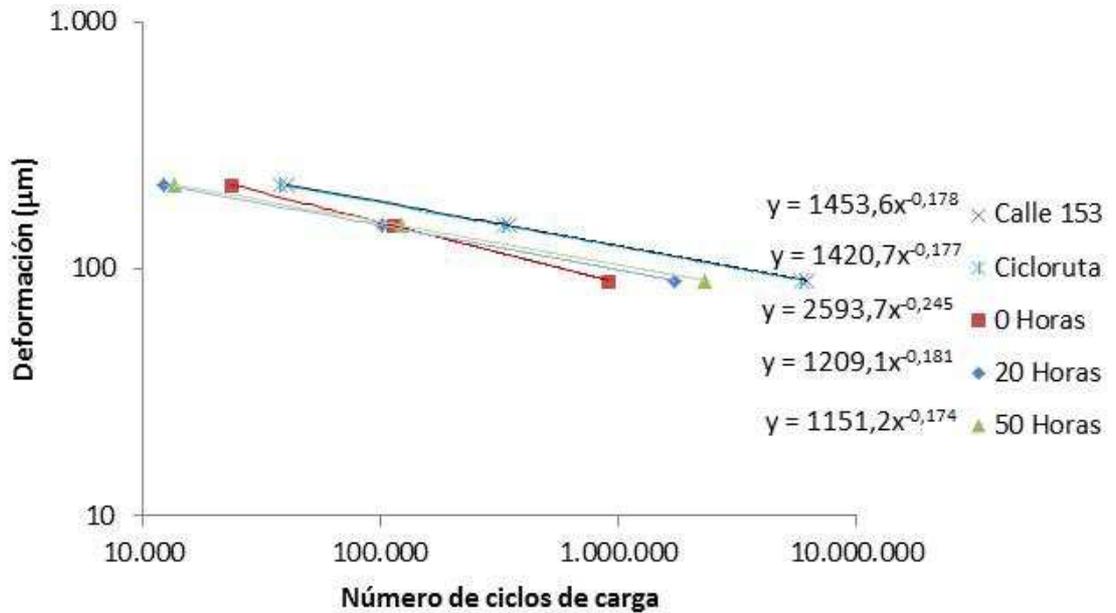
Sin detenimiento lo anterior, se debe dejar claridad en la necesidad de calibrar el ensayo francés de fatiga trapezoidal para condiciones óptimas de la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta especialmente la relación de los módulos de rigidez en función de la deformación unitaria aplicada para cada ensayo, para lo cual se recomienda variar ésta última con unos intervalos mayores a 100  $\mu\text{m}$ .



**Figura 56. Resultados obtenidos en ensayo de fatiga trapezoidal NFP-98-261.**

La figura anterior presenta curvas de fatiga evaluadas a diferentes deformaciones constantes, las mezclas envejecidas naturalmente para la Calle 153 y Carrera 11 (cicloruta) se realizaron tomando en cuenta deformaciones unitarias de 90, 150 y 220 µm, mientras que las mezclas fabricadas y envejecidas en laboratorio se efectuaron con valores de 45, 75 y 110 µm. No obstante, se observa igualmente, una relación directa entre la edad de envejecimiento (relacionada también con el aumento de la rigidez) y la pendiente de la curva, en la cual se soporta lo trazado por investigaciones previas en la ciudad de Bogotá bajo deformación controlada, en donde un incremento en la rigidez redonda en una disminución de la pendiente de la curva fatiga de las mezclas.

Siguiendo las ecuaciones potenciales encontradas por regresión, se emplearon éstas fórmulas para ajustar la gráfica poniendo como valores de entrada deformaciones axiales unitarias de 90, 150 y 220 µm (ver Figura 45).



**Figura 57. Ajuste de la curva del ensayo de fatiga trapezoidal NFP-98-261.**

No se observa una importante diferencia entre los resultados de las mezclas en servicio teniendo en cuenta que según Fernández, *et.al* (2011), las muestras envejecidas a largo plazo (vida de servicio del pavimento), las moléculas superficiales del pavimento reaccionan con las condiciones ambientales y se presentan procesos de oxidación, en contraste con la primera etapa, este proceso es lento y sus efectos se detectan con el paso de los años.

## 9. CONCLUSIONES

- Se pudo relacionar el ahuellamiento vertical obtenido en las mezclas de campo para obtener, en función de los años de servicio, el tiempo de envejecimiento en PAV (en horas). En este sentido, para un periodo de servicio de 8 años (mezcla extraída de la Calle 153) y 11 años (mezcla extraída de la Carrera 11, cicloruta) se tiene un tiempo de envejecimiento en laboratorio utilizando el equipo PAV de 20.3 y 40.6 horas correspondientemente.
- Con base en lo anterior y teniendo en cuenta únicamente los valores obtenidos del ensayo de ahuellamiento según normativa INV-E-756-07, acelerar el proceso de envejecimiento por medio del equipo P.A.V a 20 horas simula un envejecimiento natural de 8 años en servicio de la mezcla asfáltica.
- Se resalta que el desempeño por ahuellamiento disminuye con el tiempo envejecimiento a largo plazo (Reyes y Camacho, 2008). Durante los ciclos de carga inicial, la deformación vertical es alta y a continuación, se vuelve casi constante.
- No se evidenció en los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga que las pendientes de la ley de fatiga fueran mayores en mezclas con mayor envejecimiento, dando todo lo contrario a investigaciones realizadas, esto pudo ocurrir porque las muestras fabricadas en laboratorio no presentan una recuperación de la deformación debido a que se envejecieron por medio del PAV que no simula todas las condiciones ambientales reales que presenta la mezcla teniendo en cuenta solamente la presión.
- Las mezclas fabricadas en laboratorio para el ensayo de fatiga no presentaron una recuperación a la deformación; esto pudo ocurrir debido a que el asfalto que se utilizó se envejeció en el equipo PAV que utiliza un método de envejecimiento en seco en donde no hay presencia de agua haciendo que la mezcla sea más frágil ocasionando pérdida de la rigidez.

- Se deja claridad que las deformaciones establecidas para las mezclas de laboratorio (a 0, 20 y 50 horas de envejecimiento en el equipo PAV) son de 45, 75 y 110  $\mu\text{m}$  mientras que para las mezclas de campo (en servicio) se utilizaron deformaciones reglamentadas de 90, 150 y 220  $\mu\text{m}$ , se ejecutó este ensayo con esta variación en las deformaciones debido a que el software del equipo en los primeros ensayos no estaba tomando las deformaciones según norma (90, 150 y 220  $\mu\text{m}$ ) sino que estaba dividiendo estos valores a la mitad (45, 75 y 110  $\mu\text{m}$ ), observándose que los tiempos de duración de los primeros ensayos (a 0, 20 y 50 horas) se demoraron más en llegar a la falla mientras que las panelas de campo fallaron aproximadamente a la hora de haber puesto a funcionar la máquina, razón por la cual ocasionó variaciones en los resultados obtenidos.

## **10.RECOMENDACIONES**

Con base en las facilidades que presenta el ensayo de ahuellamiento con la normativa INV-E-756-07, en términos de tiempos de ejecución, se recomienda fabricar panelas en laboratorio para 10, 30 y 40 horas de envejecimiento en el equipo PAV.

Se recomienda efectuar el ensayo de fatiga trapezoidal bajo la normatividad NFP-98-261 en condiciones de desplazamiento constante variando los valores de deformación inicial tomados en este Documento (220, 150, 90  $\mu\text{m}$ ) de tal forma que se presente una correlación óptima con los datos de Módulos para mezclas extendidas en la ciudad de Bogotá., debido a que se presentaron inconsistencias en los resultados obtenidos. Lo anterior se basa teniendo en cuenta que, para un nivel muy pequeño de amplitud de deformación aplicado, el material puede soportar infinitas veces dicha amplitud sin que haya ruptura.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

- Airey, G. D. (2003). State of the Art Report on Aging Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *International Journal of Pavement Engineering*. Issue 3, Vol. 4, Pag. 165-176.
- Bahia, H., & Anderson, D. (1994). The Pressure Aging Vessel (PAV): A Test to Simulate Rheological Changes Due to Field Aging. *American Society of Testing Materials*.
- Bell, A. (1989). Summary Report on the Aging of Asphalt-Aggregate Systems. *Transportation Research Board*, Vol. 10.
- Corbett, L. W. (1970). Relationship Between Composition and Physical Properties of Asphalt. *In proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 39, pag. 481.
- Fernández, W. (2011). The Aging Phenomenon in Asphalt Mixtures. *Pontificia Universidad Javeriana. Qualifying Exam*.
- Fernández, W., Rondón, H., & Reyes, F. (2011). Envejecimiento de Asfaltos y Mezclas Asfálticas: Estado del Conocimiento.
- Garnica, P., Gómez, J. A., & Delgado, H. (2003). Algunos Aspectos de la Densificación de Mezclas Asfálticas con el Compactador Giratorio. *Publicación Técnica No. 228. Sanfandila, QRO*.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2007). Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras.
- INVIAS - Instituto Nacional de Vías. (2007). Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras. *In Norma INV - 784. Norma INV - 751. Bogotá D.C.*
- Jones, D. R & Kennedy, T. W.,. (1991). The Asphalt Model: Results of the SHRP Asphalt Research Program.

- Lesueur, D. (2009). The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification. *Advances in Colloid and Interface Science, Vol. 145*, Pag. 42-82.
- Martínez Arguelles, G. (2005). Efecto de la Radiación Solar en el Envejecimiento de Ligantes y Mezclas Asfálticas. *Universidad de los Andes. Trabajo de Grado*.
- Parada, M. L., Lepesqueur, A. J., & Caicedo, B. (n.d.). Estudio del Envejecimiento de Mezclas Asfálticas por Oxidación. *Universidad de los Andes*.
- Reyes, F., & Reyes, O. (2006). Efecto de la Presión de Contacto y La Temperatura en el Auellamiento de una Mezcla Asfáltica. *Ingeniería 10*, Pag. 65.
- Reyes, F., & Vargas, X. (2010). El Fenómeno de Envejecimiento de los Asfáltos.
- Reyes, O., & Camacho, J. (2008). Efecto de la Radiación Ultravioleta en las Propiedades Mecánicas y Dinámicas de una Mezcla Asfáltica. *Ingeniería e Investigación, Vol. 28*.
- Rondón, H., & Reyes, F. (2009). Influencia de las Condiciones Ambientales de la ciudad de Bogotá sobre el Comportamiento Mecánico de una Mezcla Asfáltica.
- Rondón, H., Pinzón, M., Reyes, F., Vacca, H., Moreno, A., & Vargas, X. (2008). Influencia de las Condiciones Ambientales de la ciudad de Bogotá sobre la Estabilidad y el Flujo Marshall de una Mezcla Densa en Caliente.
- Rondón, H., Reyes, F., & Vacca, H. (2010). Caracterización Dinámica de una Mezcla Asfáltica sometida a las Condiciones Ambientales de Bogotá. *Revista EIA*, Pag. 135-145.
- Ruíz, A., & Pérez, I. (2002). Influencia de los Betunes en las Deformaciones Plásticas de las Mezclas Bituminosas. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas - CEDEX*, Pag. 192.

Tinjacá, S. M. (2009). Análisis Comparativo del Comportamiento a Fatiga según el Modo de Ensayo para Mezclas Asfálticas Densas en Caliente. *Universidad de los Andes. Trabajo de Grado.*

Vera, J. (2012). Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a Fatiga por Reflexión. *Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Javeriana.*

Vergara, H. (1997). Diseño Directo de Pavimentos Flexibles.

## **ANEXOS**