



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

Trabajo de Grado

Caracterización de Mezclas Asfálticas por
su Resistencia a Fatiga por Reflexión

Presentado por:
Jonathan Vera Silva

Director
Manuel Santiago Ocampo Terreros

Bogotá D.C.
Abril de 2012

APROBACIÓN

El Trabajo de Grado con título "CARACTERIZACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS POR SU RESISTENCIA A FATIGA POR REFLEXIÓN", desarrollado por el estudiante JONATHAN VERA SILVA, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director

Manuel Santiago Ocampo Terreros

Jurado 1

Fredy Alberto Reyes Lizcano

Jurado 2

Wilmar Darío Fernández Gómez

Caracterización de Mezclas Asfálticas por Su Resistencia a Fatiga por Reflexión

Jonathan Vera Silva

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.

Con infinito amor, cariño y respeto dedico de una manera muy especial este trabajo de grado a mis padres, personas importantes y trascendentales en mi proyecto de vida y con las que sigo compartiendo los grandes retos que existen en ella.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar sus más sinceras muestras de agradecimiento:

...A los Ingenieros. Fredy Alberto Reyes Lizcano, Director de la Maestría en Ingeniería Civil y Manuel Santiago Ocampo Terreros, por su orientación y dedicación en el desarrollo de esta investigación, por la confianza y el apoyo constante depositado en mi persona.

...A los Ingenieros Wilmar Darío Fernández Gómez y Ana Sofía Figueroa Infante, por sus aportes en el desarrollo de este proyecto y por compartir sus amplios conocimientos y experiencia.

...A mis padres, por creer y confiar siempre en mí apoyándome en todas las decisiones tomadas en la vida y a mi novia por su amor, paciencia, comprensión y motivación.

...A mis maestros, por su asesoría y conocimientos, al personal de laboratorio por su colaboración desinteresada, a mi amigo incondicional Rodrigo y a mis compañeros, con quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional.

RESUMEN

La fatiga por reflexión en mezclas asfálticas ocurre cuando éstas son colocadas directamente sobre capas estructurales de pavimento fisuradas, como es el caso de carpetas de rehabilitación colocadas sobre losas de concreto deterioradas. El movimiento de los bloques rígidos en la capa inferior, debido a las cargas de los vehículos y los cambios de temperatura, genera esfuerzos de corte y/o tensión en la mezcla asfáltica colocada inmediatamente sobre la discontinuidad, generando fisuras en la mezcla. La aparición de estas fisuras sobre la mezcla asfáltica ocurre poco después de su colocación, y se les conoce como fisuras por reflexión debido a que se presentan como una extensión de las fisuras en la capa inferior. El propósito de este artículo es presentar la caracterización de dos tipos de mezclas asfálticas por su resistencia a la fatiga por reflexión; para esto se diseñó e implementó un equipo de laboratorio capaz de simular en laboratorio el movimiento de los bloques en la capa rígida inferior a una mezcla asfáltica. Se trabajó con una mezcla asfáltica tipo MDC-2 de Invías, frecuentemente utilizada como carpeta de rehabilitación de pavimentos rígidos, y una elaborada con asfalto modificado con grano de caucho reciclado GCR, de acuerdo con las Especificaciones IDU. Estas mezclas fueron caracterizadas por medio de módulos dinámicos, deformación permanente, resistencia a la fatiga en Banco de Fatiga y en equipo NAT, y finalmente por su resistencia a la fatiga por reflexión. Por medio del ensayo propuesto se determinaron las leyes de fatiga por reflexión para diferentes niveles de deformación y temperatura, con el objeto de predecir de manera aproximada el número de ciclos de carga que puedan soportar estas mezclas al ser utilizadas en obras de rehabilitación.

Palabras claves: fatiga por reflexión, equipo de reflexión, ley de fatiga, módulo dinámico, deformación permanente, Banco de Fatiga, NAT, MDC-2, GCR.

ABSTRACT

Reflective cracking in asphalt mixtures occurs when they are placed directly over cracked structural layers of pavement, for example rehabilitation layers placed over deteriorated concrete slabs. The displacement of rigid blocks in the lower layer due to action of vehicle loads and temperature changes generates shear and tension stresses in the asphalt mixture placed immediately above the discontinuity. This creates cracks in the mix. These cracks appear in the asphalt soon after construction, and are known as reflection cracks because they are extensions of cracks in the lower layer. The purpose of this paper is to present characterizations of two types of asphalt mixtures according to their fatigue cracking resistances. A laboratory machine was designed and used to test the fatigue crack resistance of asphalt mixtures. The machine can simulate the displacement of blocks in the rigid layer below an asphalt mixture. We worked with two asphalt mixtures: MDC-2 (a kind of dense graded asphalt used in Colombia) which is often used as a binder for the rehabilitation of rigid pavements, and Crumb Rubber Modified Asphalt made in accordance with specifications from the Instituto de Desarrollo Urbano. These mixtures were characterized by dynamic moduli, permanent deformations, fatigue resistance, and reflective cracking resistance. Fatigue resistance was determined by testing with a French style trapezoidal fatigue tester, a Nottingham Asphalt Tester and with the equipment we designed. Reflective cracking laws were determined for different levels of strain and temperature in order to predict the approximate number of load cycles that these mixtures can withstand, information needed to determine if and when they should be used in pavement rehabilitation.

Keywords: reflective cracking, reflection machine, fatigue law, dynamic moduli, permanent deformation, NAT, dense graded asphalt, Crumb Rubber Modified Asphalt

CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	1
1.2 OBJETIVO GENERAL	4
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
2 MARCO CONCEPTUAL.....	5
2.1 DEFINICIÓN DE FATIGA POR REFLEXIÓN.....	5
2.2 MECANISMOS DE FATIGA POR REFLEXIÓN	5
2.3 TIPOS DE FATIGA POR REFLEXIÓN.....	10
3 MARCO DE ANTECEDENTES	12
3.1 MÉTODOS DE ENSAYO PARA FATIGA POR REFLEXIÓN	12
3.2 MÉTODO DE ENSAYO CON EL OVERLAY TESTER MEJORADO.....	23
3.2.1 Variabilidad del ensayo con el Overlay Tester mejorado.....	24
3.2.2 Sensibilidad del ensayo con el Overlay Tester mejorado	27
3.3 VALIDACIÓN DEL OVERLAY TESTER MEJORADO.....	31
4 METODOLOGÍA	34
4.1 DESARROLLO DE UN NUEVO EQUIPO DE REFLEXIÓN	34
4.1.1 Instrumentación mecánica	35
4.1.2 Instrumentación eléctrica y electrónica	38
4.1.3 Sistema de adquisición de datos y control	42
4.1.4 Software de control	42

4.1.5	Resultados de la implementación.....	43
4.2	ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	46
4.2.1	Especificaciones del agregado	46
4.2.2	Agregado pétreo utilizado	48
4.2.3	Ensayos realizados al agregado	48
4.3	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO ORIGINAL	51
4.3.1	Especificaciones del cemento asfáltico.....	51
4.3.2	Cemento asfáltico utilizado.....	53
4.3.3	Ensayos realizados al cemento asfáltico	53
4.4	CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON CAUCHO.....	56
4.4.1	Granulometría del caucho	56
4.4.2	Cantidad óptima de caucho	57
4.4.3	Procedimiento para modificar el ligante.....	57
4.4.4	Ensayos realizados al ligante modificado	58
4.4.5	Cantidad óptima de ligante modificado con GCR	62
4.5	DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	63
4.5.1	Selección de los materiales	64
4.5.2	Selección de la estructura de agregado de diseño	66
4.5.3	Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño	78
4.5.4	Evaluación de la susceptibilidad a la humedad	85
4.6	ENSAYOS DINÁMICOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	87
4.6.1	Módulos dinámicos de mezclas asfálticas.....	87
4.6.2	Módulo resiliente de mezclas asfálticas.....	91
4.6.3	Fatiga de mezclas asfálticas en equipo NAT	95
4.6.4	Fatiga de mezclas asfálticas en Banco de Fatiga.....	99
4.6.5	Fatiga de mezclas asfálticas en Equipo de Reflexión	103
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	116
5.1	ENSAYOS DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	116
5.2	ENSAYOS DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	120

6	DISCUSIÓN	126
7	CONCLUSIONES	129
8	RECOMENDACIONES.....	131
9	BIBLIOGRAFÍA.....	133

LISTA DE ANEXOS

- ANEXO A.** Procedimiento del ensayo de fatiga por reflexión de mezclas asfálticas
- ANEXO B.** Manual de usuario del equipo de reflexión
- ANEXO C.** Resultados de los ensayos de caracterización de agregados
- ANEXO D.** Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto original
- ANEXO E.** Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto modificado con GCR
- ANEXO F.** Resultados de los ensayos realizados para el diseño de la mezcla asfáltica convencional MDC-2
- ANEXO G.** Resultados de los ensayos realizados para el diseño de la mezcla asfáltica modificada con GCR
- ANEXO H.** Resultados de los ensayos de caracterización dinámica de la mezcla asfáltica convencional MDC-2
- ANEXO I.** Resultados de los ensayos de caracterización dinámica de la mezcla asfáltica modificada con GCR

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ensayo de núcleos del MnRoad: Mezcla asfáltica y desempeño por fisuración	33
Tabla 2. Ensayos realizados sobre el agregado pétreo.....	50
Tabla 3. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente	52
Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico.....	52
Tabla 5. Ensayos realizados sobre el cemento asfáltico 80-100	55
Tabla 6. Granulometría del GCR utilizada en la modificación del cemento asfáltico.....	56
Tabla 7. Resultados de viscosidad Brookfield con 15% de caucho a 170°C.....	59
Tabla 8. Ensayos realizados sobre el ligante asfáltico modificado con GCR.....	62
Tabla 9. Propiedades de consenso y de origen de los agregados pétreos.....	66
Tabla 10. Criterio granulométrico para una mezcla nominal de 12.5 mm.....	67
Tabla 11. Granulometría de diseño para la mezcla asfáltica MDC-2.....	68
Tabla 12. Propiedades de la mezcla de agregados pétreos.....	69
Tabla 13. Número de giros del compactador giratorio SUPERPAVE	71
Tabla 14. Datos de la densificación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.6% de asfalto	73
Tabla 15. Resumen de las propiedades volumétricas y de compactación para la mezcla MDC-2 con 5.6% de asfalto	75
Tabla 16. Resumen de las propiedades volumétricas y de compactación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.7% de asfalto	76
Tabla 17. Criterios de densificación y volumétrico para la mezcla asfáltica	77
Tabla 18. Resumen de los valores de compactación de la mezcla asfáltica MDC-2	79
Tabla 19. Resumen de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica MDC-2	80
Tabla 20. Propiedades de la mezcla asfáltica con 5.7% de asfalto	81
Tabla 21. Resumen de los valores de compactación de la mezcla modificada de diseño	83

Tabla 22. Resumen de los propiedades volumétricas de la mezcla modificada con GCR.....	83
Tabla 23. Propiedades de la mezcla asfáltica modificada con GCR con 6.2% de asfalto	85
Tabla 24. Resultados de los módulos dinámicos para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR.....	116
Tabla 25. Resultados de los módulos resilientes para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR.....	117
Tabla 26. Comparación de los módulos dinámicos entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	118
Tabla 27. Comparación de los módulos resilientes entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	118
Tabla 28. Comparación entre los módulos dinámicos y módulos resilientes para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR.....	119
Tabla 29. Resultados de los ensayos de fatiga en equipo NAT para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	120
Tabla 30. Resultados de los ensayos de fatiga en Banco de Fatiga para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	121
Tabla 31. Comparación de la vida a fatiga en equipo NAT entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	122
Tabla 32. Comparación de la vida a fatiga en Banco de Fatiga entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	122
Tabla 33. Comparación entre las pendientes de fatiga obtenidas para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	123
Tabla 34. Resultados de los ensayos de fatiga en Equipo de Reflexión para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR.....	124
Tabla 35. Comparación entre las pendientes de fatiga obtenidas para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR	125
Tabla 36. Características de ensayo con el Overlay Tester	126
Tabla 37. Resultados de los ensayos de fatiga en Equipo de Reflexión.....	127

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Fatiga por reflexión en sobrecarpetas asfálticas de pavimentos PCC	6
Figura 2. Fisuración inducida térmicamente, movimientos horizontales	7
Figura 3. Fisuración inducida por tráfico, movimientos verticales	8
Figura 4. Fisuración inducida térmicamente, curvatura de la losa PCC.....	9
Figura 5. Tipos de fatiga por reflexión.....	10
Figura 6. Repetibilidad del Overlay Tester para la mezcla tipo D del TxDOT	26
Figura 7. Relación entre el número de muestras y la tolerancia específica para la vida debido a fatiga por reflexión de la mezcla tipo D del TxDOT	26
Figura 8. Influencia de la temperatura en la vida de la fatiga por reflexión.....	28
Figura 9. Influencia del desplazamiento de apertura en la vida de la fatiga por reflexión	29
Figura 10. Influencia del contenido de asfalto en la vida de la fatiga por reflexión	30
Figura 11. Influencia de los vacíos de aire en la vida de la fatiga por reflexión	31
Figura 12. Equipo de Reflexión de la Pontificia Universidad Javeriana	35
Figura 13. Motoreductor mecánico.....	36
Figura 14. Base de los bloques deslizantes	36
Figura 15. Flanches de fijación de muestras	37
Figura 16. Estructura de soporte del equipo	37
Figura 17. Transductor diferencial lineal variable (LVDT)	38
Figura 18. Sensor de fuerza tipo celda	39
Figura 19. Motor mecánico a pasos	39
Figura 20. Driver electrónico de potencia	40
Figura 21. Control digital de temperatura	40
Figura 22. Resistencia para calentamiento de la cámara	41

Figura 23. Computador de escritorio	41
Figura 24. Tarjeta de adquisición de datos	42
Figura 25. Software de control	43
Figura 26. Montaje de muestras en el equipo	45
Figura 27. Fatiga en briqueta asfáltica	45
Figura 28. Requisitos de los agregados para tratamientos y mezclas bituminosas	47
Figura 29. Curva reológica para el ligante asfáltico.....	54
Figura 30. Variación de la viscosidad con el tiempo de reacción a 170°C.....	59
Figura 31. Curva reológica del cemento asfáltico modificado con GCR	61
Figura 32. Curva reológica para el cemento asfáltico 80-100.....	65
Figura 33. Granulometría de la mezcla asfáltica MDC-2	68
Figura 34. Curva de densificación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.6% de asfalto	74
Figura 35. Curvas de densificación promedio para la mezcla asfáltica MDC-2.....	79
Figura 36. Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2	80
Figura 37. VMA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2.....	81
Figura 38. VFA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2.....	81
Figura 39. Curvas de densificación promedio para la mezcla modificada con GCR	82
Figura 40. Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR	84
Figura 41. VMA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR	84
Figura 42. VFA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR	84
Figura 43. Susceptibilidad a la humedad para la mezcla MDC-2.....	86
Figura 44. Susceptibilidad a la humedad para la mezcla modificada con GCR	86
Figura 45. Actuador dinámico marca MTS	88
Figura 46. Registro de la fuerza aplicada contra el tiempo	89
Figura 47. Registro de la deformación medida contra el tiempo	89
Figura 48. Módulos dinámicos para la mezcla asfáltica MDC-2.....	90
Figura 49. Módulos dinámicos para la mezcla asfáltica modificada con GCR	90
Figura 50. Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT).....	92
Figura 51. Módulos resilientes para la mezcla asfáltica MDC-2.....	93

Figura 52. Módulos resilientes para la mezcla asfáltica modificada con GCR	93
Figura 53. Curva maestra para la mezcla asfáltica MDC-2	94
Figura 54. Curva maestra para la mezcla asfáltica modificada con GCR.....	94
Figura 55. Fatiga en Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT)	96
Figura 56. Variación de la deformación según las repeticiones aplicadas, equipo NAT	97
Figura 57. Ley de fatiga en NAT para la mezcla asfáltica MDC-2.....	98
Figura 58. Ley de fatiga en NAT para la mezcla asfáltica modificada con GCR	98
Figura 59. Bancos de Fatiga de la Pontificia Universidad Javeriana	100
Figura 60. Variación de la fuerza según las repeticiones aplicadas, Banco de Fatiga.....	101
Figura 61. Ley de fatiga en Banco para la mezcla asfáltica MDC-2	102
Figura 62. Ley de fatiga en Banco para la mezcla asfáltica modificada con GCR.....	102
Figura 63. Equipo de Reflexión de la Pontificia Universidad Javeriana	104
Figura 64. Variación de la fuerza según las repeticiones aplicadas, Equipo de Reflexión.....	105
Figura 65. Ley de fatiga en Equipo de Reflexión para la mezcla asfáltica MDC-2	106
Figura 66. Ley de fatiga en Equipo de Reflexión para la mezcla modificada con GCR.....	106
Figura 67. Ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica MDC-2.....	107
Figura 68. Ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR	108
Figura 69. Resultados del ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica MDC-2.....	109
Figura 70. Resultados del ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR	109
Figura 71. Influencia del desplazamiento de apertura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica convencional	111
Figura 72. Influencia del desplazamiento de apertura en la fatiga por de la mezcla asfáltica modificada con GCR	111
Figura 73. Influencia de la temperatura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica convencional	112
Figura 74. Influencia de la temperatura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica modificada con GCR	113
Figura 75. Influencia del tipo de mezcla asfáltica en la fatiga por reflexión.....	114

Figura 76. Variación de la fatiga por reflexión según la densidad para la mezcla asfáltica MDC-2	115
Figura 77 Variación de la fatiga por reflexión según la densidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR	115

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

El estado de un pavimento puede ser cuantificado subjetivamente por medio de su nivel de servicio, el cual está ligado a su capacidad estructural y/o funcional. En el caso de pavimentos rígidos con niveles de servicio bajos, este es recuperado utilizando métodos de rehabilitación que van desde la reconstrucción total de la estructura hasta la colocación de carpetas asfálticas que mejoran su transitabilidad. La colocación de sobrecarpetas asfálticas resulta ser una alternativa frecuentemente utilizada en obras de rehabilitación; sin embargo, cuando estas mezclas asfálticas son colocadas directamente sobre las juntas del pavimento rígido o las fisuras de las losas, estas discontinuidades se reflejan en muy corto tiempo sobre la capa asfáltica nueva. El calcado de estas fisuras se genera por el movimiento de los bloques de la capa rígida debido a la acción conjunta de las cargas de los vehículos y los cambios ambientales. Este fenómeno se conoce como fatiga reflectiva o fatiga por reflexión por ser una extensión de las discontinuidades existentes en la capa rígida a rehabilitar.

La resistencia a la fatiga por reflexión de fisuras en mezclas asfálticas es un problema que no ha sido ampliamente abordado por los diferentes centros de investigación, y que merece la debida atención tanto por parte de los productores de mezclas asfálticas como de los diseñadores y constructores de vías. Parte de la

solución a este problema radica en una simple caracterización de la mezcla asfáltica para su adecuada utilización en estas obras de rehabilitación. A finales de la década de los setentas, Germann y Lytton (1979) diseñaron un equipo que simulaba ciclos de apertura y oclusión de fisuras en las capas de apoyo de mezclas asfálticas, reproduciendo la principal causa en la generación de fisuras por reflexión en la capa asfáltica. Este equipo, llamado como TTI Overlay Tester, se diseñó en dos presentaciones: un equipo pequeño para ensayar probetas de 37.5 cm (15 pulg) de largo por 7.5 cm (3 pulg) de ancho y altura variable, y uno más grande para ensayar probetas de 50 cm (20 pulg) de largo por 15 cm (6 pulg) de ancho y altura variable. Ambas versiones han sido utilizadas exitosamente para evaluar la efectividad en el uso de geosintéticos en el retardo de la aparición de fisuras por reflexión (Button, 1982; Button, 1987; Cleveland, 2003; Pickett, 1983).

Estudios han demostrado que estos equipos tienen el potencial de caracterizar las mezclas asfálticas en función de su resistencia a fatiga por reflexión (Zhou, 2005), agregando que su modo de operación es bastante sencillo; sin embargo, hacen ahínco en la dificultad para la elaboración o consecución de las probetas de mezcla asfáltica, las cuales por su gran tamaño son relativamente dispendiosas de fabricar en laboratorio u obtenerlas a partir de muestreos en campo. Este inconveniente fue tenido en cuenta por Zhou y Scullion (2005), quienes propusieron un nuevo equipo que funcionara con probetas más pequeñas y de fácil fabricación en laboratorio y extracción en campo.

Actualmente, existen dos equipos reconocidos para el estudio de la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, el Nottingham Asphalt Tester (NAT) que emplea probetas cilíndricas y las ensaya a esfuerzo controlado, y el equipo desarrollado en el Laboratorio Central de Puentes y Calzadas de Francia (Banco de Fatiga), que

ensaya probetas trapezoidales a deformación controlada; sin embargo, estos equipos no fueron diseñados para caracterizar una mezcla asfáltica en cuanto a su resistencia a la fatiga por reflexión.

Por otro lado, los resultados de estos ensayos de fatiga no han podido ser implementados con éxito para el diseño de pavimentos flexibles en Colombia y en muchos otros países, debido a la poca disponibilidad de equipos de laboratorio por ser un ensayo costoso y demorado (el ensayo dura aproximadamente un mes para obtener una curva de fatiga).

En esta propuesta de investigación se plantea el diseño, desarrollo, e implementación de un equipo para la caracterización de mezclas asfálticas en cuanto a su resistencia al efecto de fatiga por reflexión, utilizando probetas cilíndricas fabricadas en laboratorio con el Compactador Giratorio SUPERPAVE (equipo que dispone el laboratorio de pruebas y ensayos del departamento de Ingeniería Civil). De acuerdo con Zhou y Scullion (2005), el ensayo de caracterización de mezclas asfálticas utilizando este equipo es un ensayo rápido, fácil y repetible, entendiéndose como repetibilidad la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas y efectuadas en las mismas condiciones de medición. Otra gran ventaja del equipo es que no sólo servirá para estudiar nuevas mezclas asfálticas, sino también para la investigación y estudio de nuevos materiales que puedan ser instalados en la interface entre la capa fisurada y la nueva capa asfáltica para controlar las fisuras por reflexión, ya bien sea absorbiendo los esfuerzos excesivos, reforzando las capas asfálticas, y/o resistiendo a la formación de las fisuras.

1.2 OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar dos mezclas asfálticas en caliente para rodadura (INVIAS tipo MDC-2 e IDU tipo modificada con caucho) respecto a su resistencia al efecto de fatiga por reflexión.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un equipo para la caracterización de la resistencia de mezclas asfálticas a fatiga por reflexión.
- Desarrollar el software de operación y registro de datos.
- Elaborar el protocolo de operación del equipo.
- Diseñar las mezclas asfálticas en laboratorio de acuerdo con la metodología SUPERPAVE.
- Establecer una relación entre los resultados obtenidos con el equipo de fatiga por reflexión propuesto, y con los dos equipos de fatiga dispuestos en laboratorio (NAT y Banco de Fatiga).

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 DEFINICIÓN DE FATIGA POR REFLEXIÓN

Según la Federal Aviation Administration, se define fatiga por reflexión como las fisuras en la sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente que son reflejadas por las fisuras o patrón de juntas en el pavimento subyacente. Una descripción más detallada es que la fatiga por reflexión son las fisuras presentes en una sobrecarpeta asfáltica o capa de rodadura como resultado del reflejo de las fisuras o patrón de juntas en la capa subyacente, producto de la acción del medio ambiente o del tráfico inducido.

2.2 MECANISMOS DE FATIGA POR REFLEXIÓN

Según Von Quintus (2009), los mecanismos básicos que conducen a la aparición de fisuras por reflexión son los movimientos horizontales y los verticales diferenciales entre el pavimento original y la sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente. La teoría clásica de la causa de la fatiga por reflexión se muestra en la Figura 1, donde se explica que las fisuras pueden ser causadas por los movimientos horizontales de la expansión y contracción que se concentran en las juntas y fisuras de las losas con Concreto de Cemento Portland (PCC), y también por el aumento de deformaciones verticales en estas juntas y fisuras.

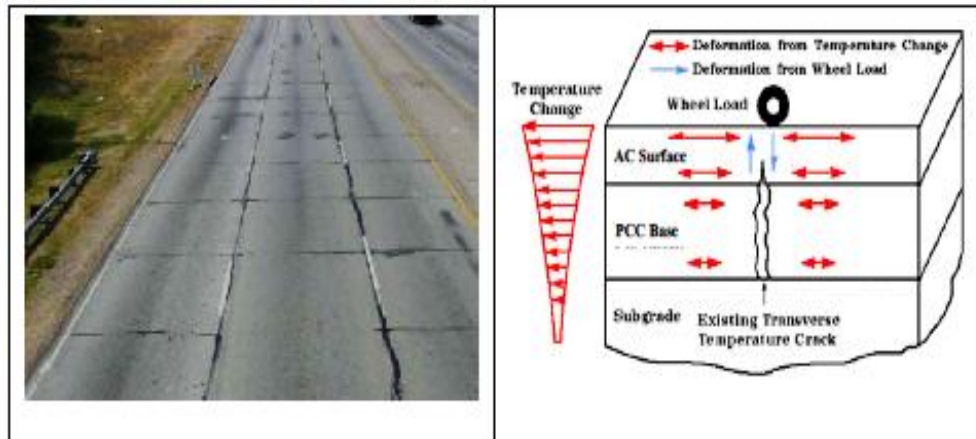


Figura 1. Fatiga por reflexión en sobrecarpetas asfálticas de pavimentos PCC

Fuente: Von Quintus (2009)

La causa más común aceptada de la fatiga por reflexión es la proveniente de los movimientos horizontales concentrados en las juntas y fisuras del pavimento existente, y se conoce como fisuración inducida térmicamente (ver Figura 2).

Estos movimientos horizontales son causados por cambios de temperatura en la losa PCC. Este desarrollo de la fatiga por reflexión debido a cargas ambientales depende de la magnitud y la velocidad de cambio de la temperatura, de la geometría de la losa, de la distancia entre las juntas o fisuras y de las propiedades del material de la sobrecarpeta. Debido a la unión entre la sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente y el pavimento existente, los esfuerzos y deformaciones por tracción producidos a partir de los movimientos articulares se vuelven críticos en las áreas de las juntas y las fisuras del PCC; por lo tanto, todos estos factores deben ser incluidos en la evaluación de los efectos ambientales o de cargas sobre la sobrecarpeta.

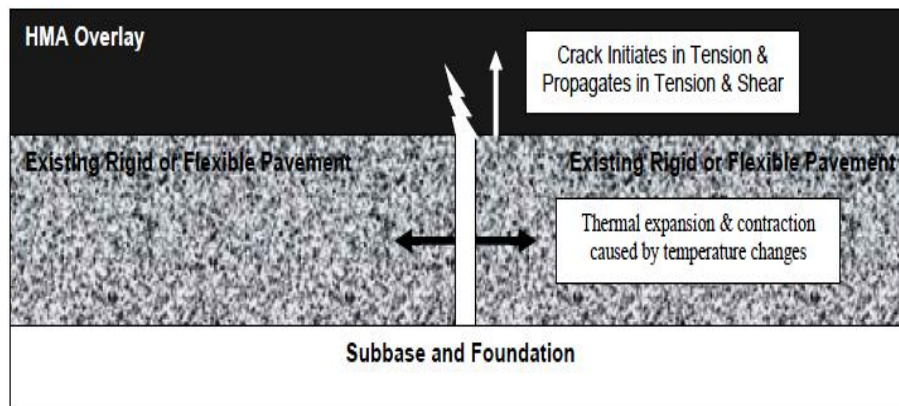


Figura 2. Fisuración inducida térmicamente, movimientos horizontales

Fuente: Von Quintus (2009)

La fatiga por reflexión también puede ser causada por deformaciones verticales diferenciales a través de las juntas y fisuras en la superficie del pavimento existente, y se conoce como fisuración inducida por el tráfico (ver Figura 3). Las deformaciones verticales diferenciales concentradas en las juntas y en las fisuras son causadas por cargas de tráfico que presionan los extremos colindantes de las losas originando concentraciones de esfuerzo cortante en la sobrecarpeta asfáltica, sobre las juntas y fisuras. Estas deformaciones pueden ser originadas por la reducción gradual de transferencia de carga en las juntas y fisuras del pavimento PCC o por el desarrollo de vacíos debajo del PCC en las juntas y fisuras, por lo que la fatiga por reflexión se considera como un fenómeno de corte-fatiga y depende de la magnitud de dichas deformaciones a través de la junta o fisura. Los factores que son más importantes incluyen la magnitud de la carga de la rueda, la cantidad de transferencia de carga a través de la junta o fisura y el apoyo de la subrasante por debajo de la losa.

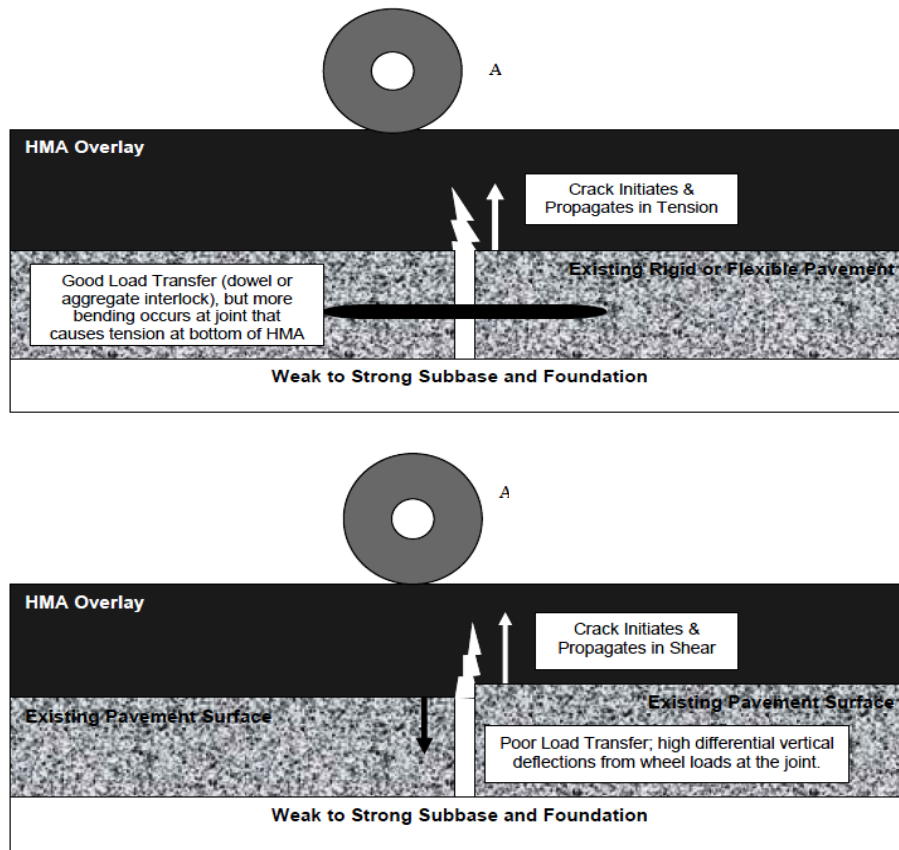


Figura 3. Fisuración inducida por tráfico, movimientos verticales

Fuente: Von Quintus (2009)

Un tercer mecanismo que causa fatiga por reflexión es la curvatura de las losas PCC en temperaturas más frías cuando la sobrecarpeta asfáltica es dura y frágil. La fatiga por reflexión causada por este mecanismo inicia en la superficie en donde la mayoría del envejecimiento de la mezcla se lleva a cabo y se propaga hacia abajo, como se muestra en la Figura 4).

La curvatura hacia arriba entre las losas adyacentes da lugar a esfuerzos de tracción en la superficie de la sobrecarpeta, y cuando estos esfuerzos superan la resistencia a la tracción, se desarrollan fisuras por encima de las juntas. Las mezclas asfálticas en caliente con alto contenido de vacíos de aire envejecerán

más rápido, lo que resulta en valores mayores de módulo, pero deformaciones por tracción menores para la falla, es decir, mezclas frágiles susceptibles a fisurarse.

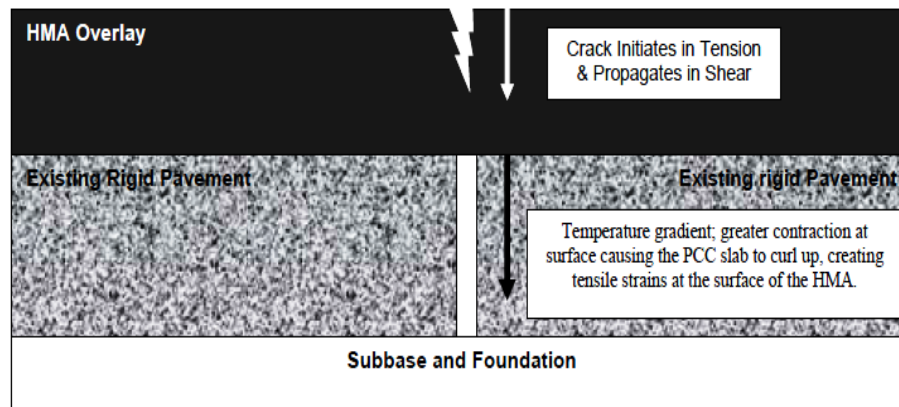


Figura 4. Fisuración inducida térmicamente, curvatura de la losa PCC

Fuente: Von Quintus (2009)

La causa de la fatiga por reflexión es el resultado del efecto combinado de estas cargas ambientales y por ruedas. Las fisuras pueden iniciarse en la superficie o en la parte inferior de la sobrecarpeta asfáltica, y la velocidad de propagación depende del espesor y propiedades de la sobrecarpeta, del tipo de refuerzo, y si se usa, de la condición de soporte de la fundación.

En resumen, los factores que comúnmente causan los movimientos en las juntas y las fisuras en la base del pavimento (factores desencadenantes) son las bajas temperaturas (descenso de la temperatura), las cargas de las ruedas, los ciclos hielo-deshielo, el envejecimiento de la mezcla asfáltica en caliente cerca de la superficie (nivel de vacíos de aire) y la contracción de la losa PCC-sobrecarpeta asfáltica y de las capas de base tratadas con cemento.

2.3 TIPOS DE FATIGA POR REFLEXIÓN

Existen dos tipos de fatiga por reflexión: fatiga simple y fatiga doble. El tipo de fatiga depende de la magnitud del movimiento horizontal de la junta o fisura y de la magnitud de la deformación vertical a través de la discontinuidad, y es inducida por las cargas del tránsito y los efectos ambientales (cambios de temperatura y humedad) como se puede observar en la Figura 5.

La fisura simple se genera directamente sobre la junta o fisura subyacente, mientras que la doble se genera a poca distancia a lado y lado de la discontinuidad, siendo esta última menos frecuente que la primera (Gaarkeuken, 1996; Marchand, 1982; Zhou, 2002).

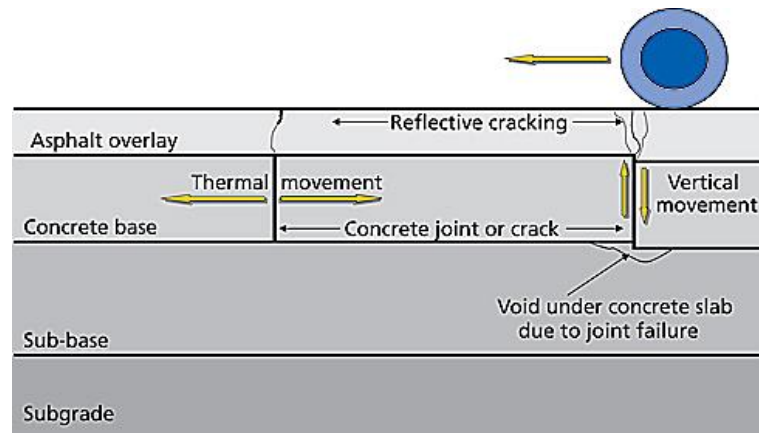


Figura 5. Tipos de fatiga por reflexión

Fuente: Nynas (2010)

De acuerdo con Zhou y Scullion (2005), basados en los resultados de un análisis en elementos finitos en tres dimensiones de capas delgadas de concreto asfáltico sobre losas de concreto rígido apoyadas sobre subrasantes blandas, se encontró que la fatiga doble ocurre solamente sobre las juntas o fisuras cuando el movimiento vertical entre los dos bloques es significativamente grande.

La fatiga por reflexión simple es causada principalmente por las variaciones diarias de temperatura, las cuales inducen movimientos horizontales en la superficie de la capa inferior donde se forma la fisura. Si la capa superior (concreto asfáltico) se encuentra fuertemente ligada a la capa inferior (capa fracturada), se generan esfuerzos de tensión en la capa asfáltica y directamente sobre la junta o la fisura. Los esfuerzos de tensión inducidos son directamente proporcionales a las propiedades de relajación de la mezcla asfáltica, y el movimiento se genera en la junta o fisura, el cual resulta proporcional a la longitud del bloque, a la variación de temperatura, y al coeficiente de expansión térmica del material de la capa inferior. Cuando el esfuerzo de tensión inducido supera la resistencia a tensión de la mezcla asfáltica, la fisura por reflexión se genera en la capa asfáltica exactamente sobre la fisura existente en la capa rígida inferior; la cual se propagará hasta la superficie de la capa asfáltica por acción de las cargas repetitivas del tránsito y/o por los ciclos de variación de la temperatura.

3 MARCO DE ANTECEDENTES

3.1 MÉTODOS DE ENSAYO PARA FATIGA POR REFLEXIÓN

El estado del arte contempla investigaciones enfocadas en ensayos de laboratorio y de campo que se han utilizado para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas en caliente y pavimentos al efecto de fatiga por reflexión. Los ensayos de laboratorio evalúan la resistencia de las mezclas asfálticas durante la etapa de diseño mientras que los ensayos de campo evalúan el desempeño de la técnica de rehabilitación seleccionada para minimizar la fatiga por reflexión en pavimentos existentes. A continuación, se listan las instituciones más importantes que han realizado investigaciones en este campo, y se detallan las características de los ensayos así como los resultados que se obtuvieron en cada una de ellas.

- **Universidad Tecnológica de Cracow, Polonia**

Grzybowska *et al.* (1993) de la Universidad Tecnológica de Cracow, Polonia, evaluaron la efectividad de los geosintéticos en las sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente, para prevenir la fatiga por reflexión. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Flexión o corte,
- Modo de falla: I y II,

- Geometría de muestras: Vigas 12x3x3 pulg,
- Tipo de carga:
 - Carga estática de flexión: tasa de carga de 0.47 pulg/min,
 - Carga repetida sinusoidal de flexión: 5 Hz,
 - Corte estático: tasa de carga de 0.04 pulg/min,
- Salidas del ensayo:
 - Flexión estática: Tiempo de falla, fuerza máxima y esfuerzo de flexión,
 - Flexión dinámica: Número de repeticiones,
 - Corte estático: Máxima fuerza de corte y esfuerzo.

Los resultados para el ensayo de flexión bajo carga repetida indicaron que las sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente reforzadas con geotextiles, presentan una mayor resistencia al desarrollo de la fisuración. Los ensayos de corte demostraron que la presencia de un geotextil disminuye más de dos veces la adherencia entre las capas asfálticas, siendo este fenómeno ventajoso para la prevención del reflejo de fisuras debido a que el geotextil absorbe parte de la energía de fisuración de la capa inferior y no la transfiere hacia arriba.

- **Instituto Tecnológico Technion-Israel, Haifa, Israel**

Livneh *et al.* (1993) usaron un dispositivo de rueda para predecir el comportamiento de los geotextiles pre-revestidos con asfalto en el retardo de la fatiga por reflexión. El dispositivo de rueda consistía en una rueda cargada que viaja de ida y vuelta sobre la parte superior de una viga de mezcla asfáltica en caliente colocada sobre una base elástica simulando el modo I de fractura. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Dispositivo cíclico de rueda,

- Modo de falla: I,
- Geometría de muestras: Vigas 28x4x4 pulg,
- Tipo de carga:
Carga cíclica por rueda,
- Salidas del ensayo:
Número de repeticiones de carga por rueda para la falla,
Longitud de fisuración versus número de repeticiones y tiempo de ensayo.

Se evaluaron tres tipos de tejidos (3M, 3/250 y 4/180) insertados en las mezclas asfálticas en caliente obteniéndose que el geotextil tipo 3/250 presentó una resistencia a la fatiga por reflexión cuatro veces superior a los otros tratamientos. Los investigadores concluyeron que este dispositivo puede servir como un método fiable para diagnosticar la eficiencia de los distintos tratamientos para el retraso de la fatiga por reflexión.

- **Laboratorio de Geo-materiales, ENTPE, Francia**

Di Benedetto *et al.* (1993) del Laboratorio de Geo-materiales de Francia, condujeron una investigación para estudiar la fatiga por reflexión en un pavimento flexible compuesto por una sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente sobre una losa tratada con cemento. El equipo prototipo se llamó "Fisurómetro" y fue propuesto para simular el fenómeno de la fatiga por reflexión en el laboratorio. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Tensión uniaxial,
 - Modo de falla: I,
 - Geometría de muestras: Losas,
 - Tipo de carga:
Estática: tasa de 0.05 a 0.22 pulg/h,
-

Uniaxial cíclica,

– Salidas del ensayo:

Medida de la energía transmitida por un tren de ondas ultrasónicas.

La comparación entre los resultados del fisurómetro y los de campo, para diferentes técnicas de mitigación de fisuras, mostró que el fisurómetro clasificó los tratamientos en orden inverso a los resultados de campo; esta diferencia podría deberse a que el fisurómetro sólo simula la contracción térmica sin considerar el efecto del tráfico.

• **Universidad Técnica de Viena, Austria**

Tschegg *et al.* (1993) de la Universidad Técnica de Viena, Austria, desarrollaron un nuevo dispositivo de ensayo llamado “Cuña de separación” para caracterizar el modo I de la fractura en las mezclas asfálticas en caliente. El dispositivo mide la curva carga-desplazamiento de una muestra asfáltica cúbica o cilíndrica y provee información para caracterizar el comportamiento a fractura de los especímenes ensayados. Las características del ensayo se muestran a continuación:

– Tipo de ensayo: Separación,

– Modo de falla: I,

– Geometría de muestras: Cúbica o prismática,

– Tipo de carga:

Estática: tasa de carga de 0.05 pulg/min,

– Salidas del ensayo:

Fuerza horizontal versus desplazamiento,

Máxima fuerza vertical versus temperatura,

Energía de fisuración versus temperatura.

Los investigadores concluyeron que la fuerza máxima de separación no es un parámetro adecuado para diferenciar las mezclas asfálticas en caliente dado que dos mezclas diferentes pueden tener la misma fuerza máxima de separación y el comportamiento a fisuración diferentes. Por otro lado, se recomendó la energía específica de fractura como un parámetro de ensayo más confiable para diferenciar las mezclas asfálticas diferentes.

- **Laboratorio de Caminos Públicos de Autum, Francia**

Dumas y Vecoven (1993) resumieron los resultados y las conclusiones de 210 ensayos de contracción-flexión realizados con diversos tipos de técnicas para la reducción de la fatiga por reflexión. El ensayo de contracción-flexión utilizado fue desarrollado en 1988 para evaluar la eficacia de los sistemas anti-fisuras y simula al mismo tiempo la contracción térmica del pavimento y las cargas de tráfico pesado a una temperatura constante de 5°C. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Biaxial,
- Modo de falla: I y II,
- Geometría de muestras: Vigas 24x2.8x2.8 pulg,
- Tipo de carga:
 - Carga cíclica vertical: 1 Hz.
 - Carga estática horizontal: 0.024 pulg/h,
- Salidas del ensayo:
 - Tiempo de inicio de la fisuración y longitud,
 - Tiempo de propagación de la fisuración y longitud,
 - Tiempo de rotura.

Los resultados del ensayo contemplaron una sobrecarpeta AC 0/10 de 2.4 pulgadas ubicada sobre una capa intermedia de tejidos (geotextil), una mezcla asfáltica en caliente rica en asfalto y una membrana intermedia que absorbe esfuerzos (SAMI). Estos concluyeron que los tejidos para pavimentación retrasan el tiempo de inicio de la fisuración, mientras que la mezcla rica en asfalto ralentiza la propagación de la fisuración.

- **Colegio Universitario de Dublin, Irlanda**

Gibney *et al.* (2002) evaluaron la resistencia a la fatiga por reflexión de una variedad de mezclas asfálticas en caliente que se usaron en Irlanda, por medio un ensayo acelerado de rueda capaz de simular, de arriba hacia abajo y de abajo hacia arriba, la fisuración en la capa de mezcla asfáltica en caliente ubicada sobre losas de concreto. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Dispositivo cíclico de rueda,
- Modo de falla: I y II,
- Geometría de muestras: Vigas,
De abajo hacia arriba: 5.5x11x2.0 pulg,
De arriba hacia abajo: 5.5x10.2x2.0 pulg,
- Tipo de carga:
Carga cíclica por rueda: 21 ciclos/min,
- Salidas del ensayo:
Número de repeticiones de carga por rueda versus longitud de fisura,
Deformación de las losas sobre el centro en 8 pulgadas, a lo largo del ensayo.

No se realizaron ensayos por lo que no se presentan resultados.

- **Universidad de Illinois, Estados Unidos**

Dempsey (2002) desarrolló y evaluó una capa intermedia que absorbe esfuerzos (ISAC) para mitigar la fatiga por reflexión en las sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente. El sistema ISAC estuvo compuesto por un geotextil de baja rigidez como capa inferior, una membrana viscoelástica como capa central, y un geotextil de muy alta rigidez para la capa superior. La eficacia de la capa ISAC para el control de la fatiga por reflexión fue evaluada en laboratorio, en una sección de pavimento conformada por una sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente ubicada sobre una losa articulada PCC. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Tensión uniaxial,
- Modo de falla: I,
- Geometría de muestras:
Capa HMA sobre losa PCC de 6x90x2.7 pulg,
- Tipo de carga:
Carga cíclica uniaxial: frec. de 0.0016 pulg/min (triangular),
- Salidas del ensayo:
Deformación en la sobrecarpeta HMA en función de los ciclos,
Longitud de fisuración versus tiempo.

Como resultado, la capa intermedia que absorbe esfuerzos (ISAC) tuvo un desempeño mucho mejor que otros productos comerciales, cuando esta fue evaluada con el dispositivo propuesto.

- **Instituto Tecnológico Aeronáutico (ATI), Brasil**

Montestruque *et al.* (2004) presentaron un método de ensayo innovador para estudiar el efecto de una capa intermedia con geomalla de poliéster en el desempeño de una capa con mezcla asfáltica en caliente no fisurada sobre una capa similar pero fisurada. La evaluación en laboratorio se llevó a cabo utilizando un ensayo de fatiga dinámico realizado sobre vigas prismáticas que descansan sobre una base elástica (placas de acero). Este sistema fue concebido para simular un pavimento fisurado después de su rehabilitación.

Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Flexión o corte,
- Modo de falla: I y II,
- Geometría de muestras: Vigas 18x6x3 pulg,
- Tipo de carga:
Carga sinusoidal: frecuencia de carga de 20 Hz,
- Salidas del ensayo:
Deformación permanente versus número de ciclos de carga,
Esfuerzo de tensión versus longitud de la fisuración,
Corte estático: Máxima fuerza de corte y esfuerzo.

Los resultados indicaron que la sobrecarpeta con mezcla asfáltica en caliente reforzada con la geomalla de poliéster tuvo una vida de hasta seis veces más que la misma sobrecarpeta sin refuerzo.

- **Universidad Atlántica de Florida, Estados Unidos**

Sobhan *et al.* (2004) evaluaron los efectos de reforzar una sobrecarpeta (mezcla asfáltica en caliente) con geomallas rígidas, como medida para mitigar la fatiga por reflexión cuando esta es colocada sobre las juntas de losas PCC. Los objetivos fueron la evaluación de la propagación de fisuras bajo cargas cíclicas y la evaluación de los efectos de la ubicación de la geomalla en la sobrecarpeta sobre la propagación de las fisuras. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Flexión (punto único de carga),
- Modo de falla: I,
- Geometría de muestras: Vigas 18x6x7.5 pulg,
- Tipo de carga:
 - Estática,
 - Carga cíclica (sinusoidal): 2 Hz,
- Salidas del ensayo:
 - Valor de carga o número de repeticiones para la primera fisura reflectada.
 - Valor de carga o número de repeticiones para la propagación de la fisura a la mitad de la sobrecarpeta,
 - Valor de carga o número de repeticiones para la propagación de la fisura a la superficie de la sobrecarpeta.

Se encontró que, con la misma relación de carga, las losas con geomallas incrustadas en la parte inferior tuvieron una mejor resistencia a la fatiga por reflexión que las losas con geomallas adheridas en la parte inferior mediante un riego de liga. Además, se comprobó que la geomalla incorporada a media altura fue más efectiva que la geomalla ubicada en la parte inferior de la sobrecarpeta.

- **Universidad Politécnica de Madrid, España**

Gallego y Prieto (2006) presentaron un dispositivo de rueda para simular la fatiga por reflexión (WRC), con la finalidad de caracterizar la resistencia de las sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente ante este fenómeno. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Biaxial,
- Modo de falla: I y II,
- Geometría de muestras: Vigas 12x12x2.4 pulg,
- Tipo de carga:
 - Carga cíclica por rueda,
 - Fuerza de tracción estática: 0.001 a 50 um/h,
- Salidas del ensayo:
 - Longitud vertical de la fisura con tiempo,
 - Desplazamiento vertical con tiempo,
 - Movimiento relativo entre los bordes de las fisuras.

Se estudiaron tres tratamientos: sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente sin geotextil, y sobrecarpetas reforzadas con dos diferentes tipos de geotextil. Como resultado se tuvo que la sobrecarpeta sin refuerzo evidenció el peor desempeño.

- **Laboratorio Regional de Puentes y Calzadas, Francia**

Tamagny *et al.* (2004) evaluaron la capacidad y efectividad del dispositivo Mefisto, designado para determinar el comportamiento anti-fisuras por reflexión de varios materiales, simulando la fisuración por fatiga en las sobrecarpetas con mezcla asfáltica en caliente. Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Biaxial,
- Modo de falla: I y II,
- Geometría de muestras: Vigas 2x2x26 pulg,
- Tipo de carga:
Estática (carga horizontal).
Cíclica (carga vertical): sinusoidal 10 Hz.
- Salidas del ensayo:
Número de repeticiones versus fuerza vertical o energía disipada,
Número de repeticiones versus longitud de la fisuración.

No se realizaron ensayos todavía por lo que no se cuenta con resultados.

- **Instituto de Transporte de Texas, Estados Unidos**

Zhou *et al.* (2003) del Instituto de Transporte de Texas (TTI) mejoraron el equipo TTI Overlay Tester que había sido ampliamente utilizado para evaluar la eficacia de diferentes materiales geosintéticos, desde que fue diseñado por Lytton *et al.* (1979). Las características del ensayo se muestran a continuación:

- Tipo de ensayo: Uniaxial,
- Modo de falla: I,
- Geometría de muestras:
Núcleos: diámetro de 6 pulg,
Vigas: 6x3x2 pulg,
- Temperatura: 0 - 35 °C,
- Desplazamiento de apertura: 0 - 2 mm,
- Tasa de carga:
24 horas (o más) por ciclo – 10 segundos por ciclo,

- Tipo de carga:
Carga cíclica triangular con magnitud constante,
- Salidas del ensayo:
Número de repeticiones versus longitud de la fisuración,
Número de repeticiones versus tiempo de ensayo.

Los principales resultados del trabajo experimental intensivo, indicaron una muy buena repetibilidad para el equipo. Se demostró su sensibilidad a la temperatura de ensayo, a la apertura del desplazamiento, al contenido y tipo de asfalto, y a los vacíos de aire. También demostró consistencia entre los resultados de los ensayos a las mezclas asfálticas y su correspondiente desempeño en campo. El criterio de falla para determinar la resistencia a la fatiga por reflexión fue de 300 ciclos a 77 °F (25 °C) y 0.025 pulg (0.64 mm) de desplazamiento de apertura. Si se utiliza una capa inferior rica en asfalto, la vida en la sobrecarpeta para la fatiga por reflexión debe ser por lo menos de 750 ciclos.

3.2 MÉTODO DE ENSAYO CON EL OVERLAY TESTER MEJORADO

Zhou et al. (2003) mejoraron el TTI Overlay Tester para ser controlado plenamente por un sistema computarizado con programas especiales. Los datos del ensayo incluyendo el tiempo, el desplazamiento y la fuerza, son registrados automáticamente y guardados como archivo de Excel. El tamaño de la muestra del Overlay Tester mejorado se redujo a 150 mm de largo por 75 mm de ancho y por 38 a 50 mm de alto, haciendo del Overlay Tester un ensayo más práctico y más fácil para manejar muestras fabricadas con el compactador giratorio Superpave (SGC) o núcleos extraídos de campo.

El sistema mejorado puede ser conducido en el modo de desplazamiento controlado bajo las características de ensayo mostradas anteriormente, siendo su principal resultado la vida debido a la fatiga por reflexión de una mezcla asfáltica en caliente traducida en el número de ciclos para lograr la rotura total de la muestra. Los investigadores encontraron que este valor es un buen indicador de la resistencia a la fisuración por reflexión de las mezclas asfálticas y que tiene una buena correlación con el cambio de la carga.

Según Zhou y Scullion (2005), la observación de los resultados de varios ensayos con el Overlay Tester demostró que la relación entre la carga y el número de ciclos tiene tres fases distintas para la propagación de la grieta:

- Fase I: Inicio de la fisura y propagación constante,
- Fase II: Propagación avanzada de la fisura,
- Fase III: Falla o rotura de la muestra.

Con base en la discusión anterior, la vida debido a la fatiga por reflexión de las mezclas asfálticas, puede ser definida por el número de ciclos correspondientes con el inicio de la Fase II o la Fase III. Desde el punto de vista conservador, se utiliza el inicio de la Fase II para definir la vida por fatiga por reflexión. Utilizando el esquema de evaluación descrito anteriormente, la vida debido a la fatiga por reflexión de la muestra se determinó para cuatro ciclos (10 seg/ciclo).

3.2.1 Variabilidad del ensayo con el Overlay Tester mejorado

Zhou *et al.* (2003) analizaron la variabilidad del ensayo con el Overlay Tester. El primer paso para evaluar el equipo, especialmente con el tamaño de muestra pequeño recomendado (núcleos obtenidos con el Compactador Giratorio

Superpave en lugar de placas con mezcla asfáltica en caliente), fue determinar la repetibilidad del ensayo. En general, cuanto más pequeña fue la muestra, la variabilidad de los resultados del ensayo aumentó. Desde que el Overlay Tester mejorado fue usado con una muestra pequeña, hubo preocupación sobre su capacidad de repetición. Por ello, se seleccionaron dos tipos de mezclas del Instituto de Transporte de Texas (tipo D y CMHB-C con un asfalto PG64-22) para fabricar seis ejemplares idénticos (6 pulg [150 mm] de diámetro por 2.25 pulg [57 mm] de altura), utilizando el Compactador Giratorio Superpave. Luego, las muestras fueron cortadas a 1.5 pulg (38 mm) de altura con una hoja de doble sierra y después a 1.5 pulg (38 mm) de cada lado de las muestras. El contenido de aire de cada muestra se controló en el 7 ± 0.5 por ciento después de recortar las muestras. Por último, seis muestras para cada mezcla se pegaron a las placas del Overlay Tester. El ensayo prueba se llevó a cabo a temperatura ambiente ($77\text{ }^{\circ}\text{F}$ [$25\text{ }^{\circ}\text{C}$]) y el desplazamiento de apertura se estableció en 0.025 pulg (0.63 mm).

La Figura 6 mostró la vida debido a la fatiga por reflexión de las seis muestras idénticas Tipo D. Se encontró un promedio de vida de 140 ciclos con una desviación estándar y un coeficiente de variación de 11.7 y 8.3 por ciento, respectivamente. En términos generales, el coeficiente de variación de las mezclas asfálticas es de 10 a 25 por ciento. Estos resultados indican claramente que los ensayos en el Overlay son repetibles.

Por otra parte, la mezcla CMHB-C mostró una escasa resistencia a fatiga por reflexión en el Overlay Tester, con cada una de las muestras falladas después de dos ciclos. Por lo tanto, se excluyó esta mezcla análisis de repetibilidad.

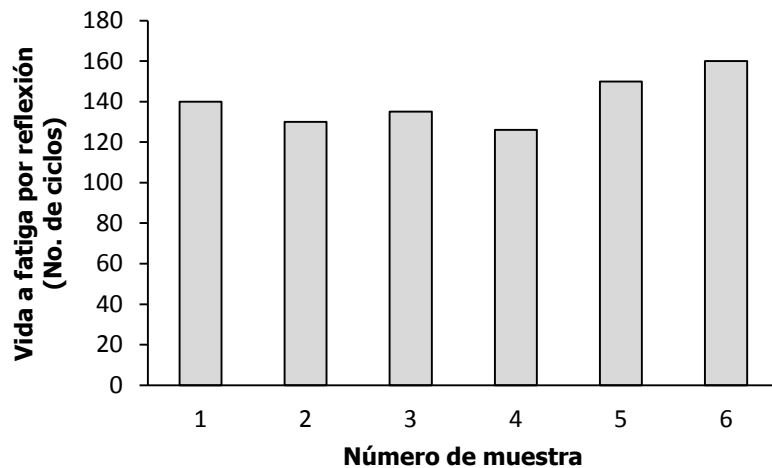


Figura 6. Repetibilidad del Overlay Tester para la mezcla tipo D del TxDOT

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

Los resultados del ensayo para la mezcla tipo D se utilizaron para proporcionar una estimación del número mínimo de repeticiones necesarias para realizar el ensayo. La Figura 7 muestra la relación entre el número de muestras y la tolerancia especificada. Se puede observar que el promedio de vida de dos ejemplares debido a fatiga por reflexión estará dentro de ± 12 por ciento de la "verdadera" vida de la mezcla asfáltica con una confiabilidad del 95 por ciento.

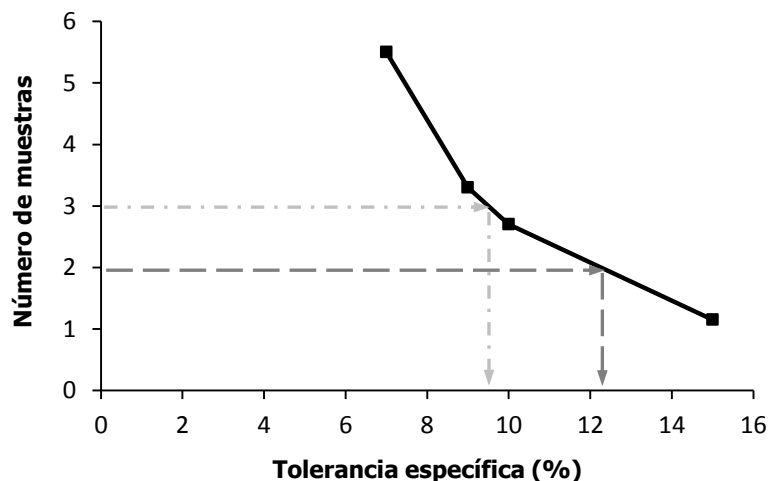


Figura 7. Relación entre el número de muestras y la tolerancia específica para la vida debido a fatiga por reflexión de la mezcla tipo D del TxDOT

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

Basándose en los resultados de este análisis, se recomendó el uso de al menos tres réplicas de la mezcla asfáltica en caliente para un error de menos del 10 por ciento.

3.2.2 Sensibilidad del ensayo con el Overlay Tester mejorado

Zhou *et al.* (2003) investigaron la sensibilidad del Overlay mejorado con las propiedades del material y condiciones de ensayo. Los parámetros analizados fueron la temperatura de ensayo, el desplazamiento de apertura, los vacíos de aire, el grado de desempeño del asfalto y el contenido de asfalto. Para esta investigación se utilizó la mezcla tipo D del Instituto de Transporte de Texas (TxDOT), con un contenido óptimo de asfalto de 5.1 por ciento. Cabe señalar que sólo un parámetro fue variable en este ensayo de sensibilidad y los otros se mantuvieron constantes. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

- **Influencia de la temperatura en la vida de la fatiga por reflexión**

Se utilizó un asfalto PG76-22 modificado con SBS para moldear seis muestras idénticas con un contenido de vacíos de aire del 4 por ciento. El ensayo con el Overlay Tester se realizó a 77 °F (25 °C) y a 50 °F (10 °C) para un desplazamiento de apertura igual a 0.025 pulg (0.63 mm) y se utilizaron tres repeticiones para cada temperatura.

El promedio de vida debido a la fatiga por reflexión se evidenció en la Figura 8, la cual mostró la influencia significativa de la temperatura en la vida de las mezclas asfálticas en caliente, por lo que se concluyó que los ensayos con el Overlay Tester son sensibles a la temperatura.

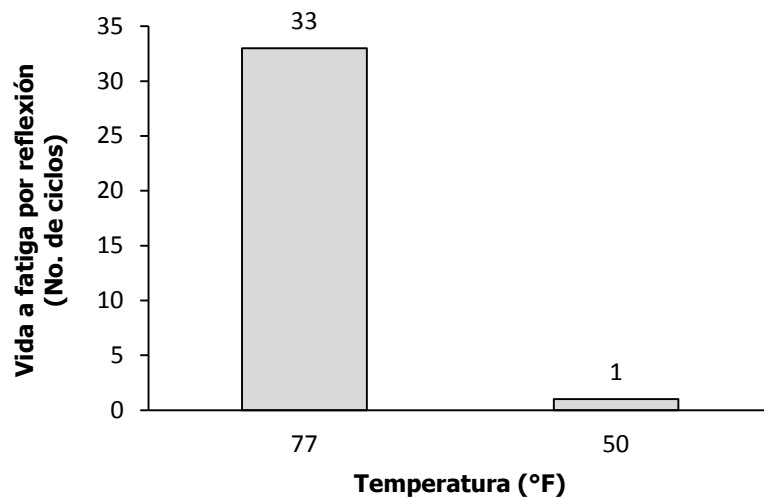


Figura 8. Influencia de la temperatura en la vida de la fatiga por reflexión

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

- **Influencia del desplazamiento de apertura en la vida de la fatiga por reflexión**

Se utilizó un asfalto PG76-22 modificado con SBS para moldear seis muestras idénticas con un contenido de vacíos de aire del 4 por ciento. El ensayo con el Overlay Tester se realizó a 77 °F (25 °C) para dos desplazamientos de apertura de 0.025 pulg (0.63 mm) y de 0.035 pulg (0.89 mm) y se utilizaron tres repeticiones para cada desplazamiento.

El promedio de vida debido a la fatiga por reflexión se evidenció en la Figura 9, la cual indicó que la vida de las mezclas asfálticas en caliente disminuyó con el aumento del desplazamiento, por lo que se concluyó que los resultados de los ensayos con el Overlay Tester son sensibles al desplazamiento de apertura.

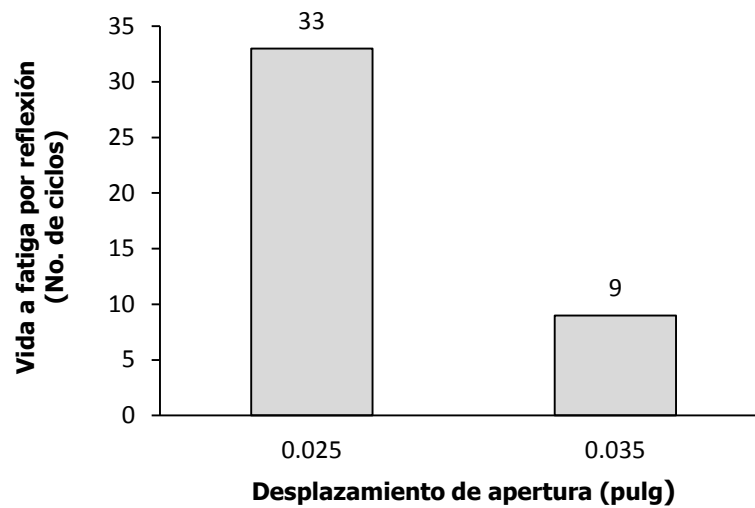


Figura 9. Influencia del desplazamiento de apertura en la vida de la fatiga por reflexión
Fuente: Zhou *et al.* (2003)

- **Influencia del contenido de asfalto en la vida de la fatiga por reflexión**

Se utilizó un asfalto PG64-22 para moldear tres muestras iguales con cada uno de los tres contenidos de asfalto: 4.2, 5.1 (óptimo) y 6.1 por ciento. El ensayo con el Overlay Tester se realizó a 77 °F (25 °C) para un desplazamiento de apertura de 0.025 pulg (0.63 mm).

El promedio de vida debido a la fatiga por reflexión se presentó en la Figura 10, y mostró el aumento significativo en la vida de las mezclas asfálticas en caliente con el incremento del contenido de asfalto. Los resultados fueron consistentes con los resultados de los ensayos tradicionales de fatiga en la viga de flexión.

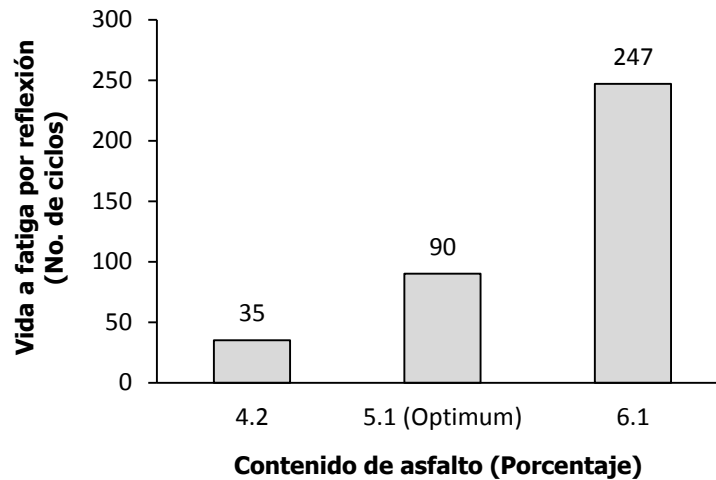


Figura 10. Influencia del contenido de asfalto en la vida de la fatiga por reflexión

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

- **Influencia del Grado de Desempeño del asfalto en la vida de la fatiga por reflexión**

Los datos de la Figura 9 y Figura 10 mostraron que el aumento del PG de 64 a 76 dio lugar a una disminución en la vida de la fatiga por reflexión de 90 a 33, indicando una pobre resistencia por parte de los asfaltos rígidos.

- **Influencia de los vacíos de aire en la vida de la fatiga por reflexión**

La Figura 11 mostró la influencia del contenido de vacíos de aire sobre la vida de la fatiga por reflexión, obteniéndose una mejor resistencia con vacíos de aire mayores. Los investigadores relacionan este comportamiento con la mayor posibilidad de generación de muestras más densas y más fuertes cuando se reduce los vacíos de aire de 7.4 a 4.2 por ciento, por lo que las muestras con contenidos de vacíos de aire menores tienen también una mayor rigidez y mayor resistencia. Sin embargo, la fatiga por reflexión (de origen térmico) simulada por el Overlay Tester es un escenario diferente, ya que si se baja la temperatura y se mantiene

constante, la mezcla más densa y con mayor módulo sufre un mayor esfuerzo térmico. Contrariamente, si su resistencia es menor, el esfuerzo térmico inducido en la muestra con mayor contenido de aire es más bajo. Cuando el esfuerzo térmico inducido en una muestra es superior a su resistencia, se produce la fisuración. Si una muestra con menor contenido de vacíos de aire es o no resistente a la fatiga por reflexión térmica, depende tanto de su rigidez como de su resistencia.

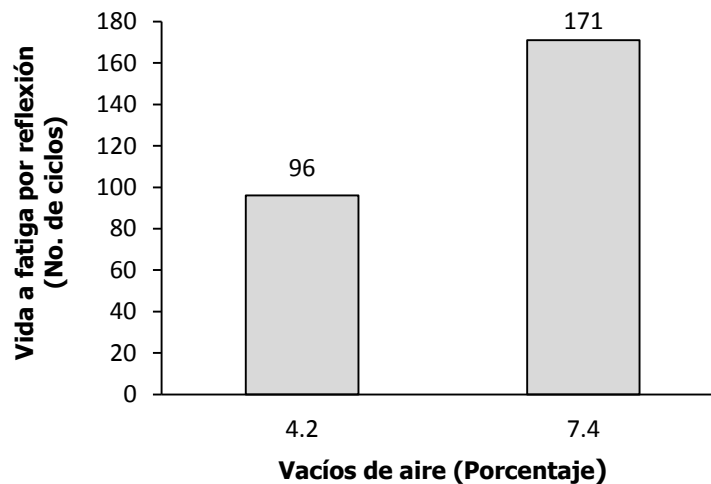


Figura 11. Influencia de los vacíos de aire en la vida de la fatiga por reflexión
Fuente: Zhou *et al.* (2003)

3.3 VALIDACIÓN DEL OVERLAY TESTER MEJORADO

Zhou *et al.* (2003) llevaron a cabo la validación del Overlay Tester mejorado en tres pasos. En primer lugar, se discutió la eficacia del Overlay Tester en la caracterización de la resistencia de las mezclas asfálticas a fatiga por reflexión. Luego, para evaluar esta resistencia con el Overlay Tester se utilizaron núcleos de campo con desempeño a fatiga por reflexión conocido. Por último, se ensayaron núcleos extraídos del MnRoad para comprobar el potencial del Overlay Tester en la caracterización de la resistencia de las mezclas asfálticas a fisuración por bajas temperaturas.

La validación del TTI Overlay Tester se realizó con base en la ejecución de diversos proyectos en todo Texas. Desde el año 2000, el equipo pequeño fue empleado con éxito para caracterizar la resistencia de diferentes mezclas asfálticas a su fatiga por reflexión con desempeños de fatiga por reflexión conocidos de campo.

Las fisuras por reflexión aparecieron rápidamente en las nuevas sobrecarpetas colocadas en todo el estado y se extrajeron núcleos de estos pavimentos con bajo desempeño para ser evaluados con el Overlay Tester y los resultados se compararon con los de los núcleos de los Estudios Especiales del Pavimento 5 (SPS5) cerca de Dallas, pertenecientes a una sobrecarpeta ubicada sobre una base estabilizada, sin presencia de fisuras por reflexión después de 10 años de servicio. Todos estos núcleos con desempeños buenos y malos se utilizaron para validar el TTI Overlay Tester. Las mezclas asfálticas en caliente ensayadas con el Overlay Tester cubrieron mezclas tipo C del TxDOT con caucho de neumático PG 76-22, mezclas tipo D con PG 64-22 y mezclas tipo D con 30 y 75 por ciento de concreto asfáltico reciclado. Varios núcleos fueron extraídos de los diferentes proyectos y ensayados con el Overlay Tester; asimismo, se llevó a cabo una inspección detallada de la condición del pavimento. Por lo tanto, la capa fue sometida a fatiga por reflexión para identificar los mecanismos de falla y el buen desempeño de la mezcla, con la finalidad de validar las capacidades del Overlay en el desempeño de las sobrecarpetas a fatiga por reflexión.

En resumen, los resultados de los ensayos con el Overlay Tester fueron compatibles con el desempeño en campo, diferenciándose las fisuras de las mezclas con pobre resistencia de las mezclas con buena resistencia. Los estudios de los casos evaluados también confirmaron que el Overlay Tester es una herramienta rápida en función de su desempeño para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas a fatiga por reflexión. Los resultados con el Overlay Tester de

los núcleos de campo con desempeño conocido, extraídos de las distintas carreteras, mostraron un muy buen comportamiento de las mezclas asfálticas cuando la vida debido a fatiga por reflexión (desde el Overlay Tester) fue mayor que 300. Por lo tanto, los investigadores propusieron el criterio de falla preliminar para la resistencia a fatiga por reflexión de 300 ciclos a 77 °F (25 °C) y 0.025 pulg (0.64 mm) de desplazamiento de apertura; de igual manera, para el uso de una capa inferior rica en asfalto se propuso una vida debido a fatiga por reflexión de al menos 750 ciclos.

El TTI Overlay Tester también fue validado utilizando los núcleos del MnRoad para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas a su fisuración por baja temperatura. Se seleccionaron tres núcleos de ensayo representativos, (15, 18 y 20) del MnRoad, mostrándose en la Tabla 1 su desempeño en campo. A pesar de los núcleos estaban compuestos por diferentes capas, sólo se ensayó en el Overlay Tester la capa superior de mezcla asfáltica en caliente, ya que es la capa crítica para la fisuración por baja temperatura. El Overlay Tester se ensayó a una temperatura de 77 °F (25 °C) para un desplazamiento de apertura de 0.025 pulg, y sus resultados (Tabla 1) fueron compatibles con el desempeño a fisuración de las mezclas asfálticas observado en campo. Los resultados también indicaron que tanto el contenido de asfalto (núcleos 15 y 18) como el grado de desempeño del asfalto (núcleos 15, 18 y 20) tuvieron una influencia en la resistencia a fisuración, lo cual fue consistente con los resultados del estudio de sensibilidad realizado.

Tabla 1. Ensayo de núcleos del MnRoad: Mezcla asfáltica y desempeño por fisuración

Núcleo de Ensayo	Tipo de Asfalto	Diseño de Mezcla (Marshall)	Pies Lineales de Fisuración en Campo	Resultados Overlay Tester
15	PG 64-22	75 golpes	475	91
18	PG 64-22	50 golpes	315	153
20	PG 58-28	35 golpes	100	500

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

4 METODOLOGÍA

4.1 DESARROLLO DE UN NUEVO EQUIPO DE REFLEXIÓN

Actualmente, la Pontificia Universidad Javeriana cuenta con equipos de laboratorio que permiten realizar la caracterización dinámica de briquetas asfálticas a través de ensayos de rigidez, fatiga y ahuellamiento. Sin embargo, los equipos como el Nottingham Asphalt Tester (NAT) y el Banco Francés que simulan la fatiga de los materiales asfálticos por flexión no son capaces de reproducir el efecto del reflejo de fisuras por tracción directa en las muestras asfálticas de sobrecarpetas, causadas por cambios bruscos en la temperatura del ambiente; por esta razón, en el presente trabajo se desarrolló un Equipo de Reflexión por tracción directa que permita caracterizar las mezclas por su resistencia a la fatiga por reflexión.

Debido a los requerimientos buscados en el ensayo de fatiga, se diseñó y construyó un Equipo de Reflexión basado en el Overlay Tester del Instituto de Transporte de Texas, si bien es cierto se disponen de muchos equipos que permiten realizar esta caracterización, este equipo permite generar repeticiones de apertura y oclusión de manera cíclica, simulando de la mejor manera posible los cambios ocurridos en el pavimento por la acción del gradiente térmico. Asimismo, permite ensayar con muestras asfálticas elaboradas en laboratorio con el Compactador Giratorio Superpave así como núcleos de pavimentos existentes extraídos con diamantina.

4.1.1 Instrumentación mecánica

La Figura 12 muestra el Equipo de Reflexión de la Pontificia Universidad Javeriana, el cual funciona con un sistema mecánico compuesto por un motor a pasos que aplica cargas repetidas de tensión directa a los especímenes. Este motor es capaz de realizar 1000 pasos por revolución y posee un torque 641 n-cm.

Asimismo, la máquina cuenta con dos bloques, uno fijo y otro que se desplaza horizontalmente, midiendo a su vez automáticamente y registrando la carga, el desplazamiento y la temperatura cada 0.1 seg.

El bloque desplazado aplica tensión con una onda cíclica de forma triangular para un desplazamiento máximo constante de 0.2 cm (0.08 pulg.) siendo el valor máximo recomendado de 0.063 cm. (0.025 pulg.). El bloque desplazado alcanza el desplazamiento máximo y luego retorna a su posición inicial en 10 seg. (1 ciclo).



Figura 12. Equipo de Reflexión de la Pontificia Universidad Javeriana

Adicionalmente, el Equipo de Reflexión para mezclas asfálticas está constituido por otros elementos mecánicos cuyas características se describen a continuación:

Se utilizó un motoreductor como elemento encargado de amplificar la potencia mecánica suministrada por el motor a pasos al sistema de desplazamiento. La Figura 13 muestra este componente.



Figura 13. Motoreductor mecánico

Para el desplazamiento del bloque se utilizó un sistema de desplazamiento lineal basado en tornillo. El desplazamiento tiene una velocidad de 2 mm por cada revolución y convierte el torque del motoreductor en potencia de desplazamiento lineal. La Figura 14 presenta el tornillo que guía el movimiento de los bloques.

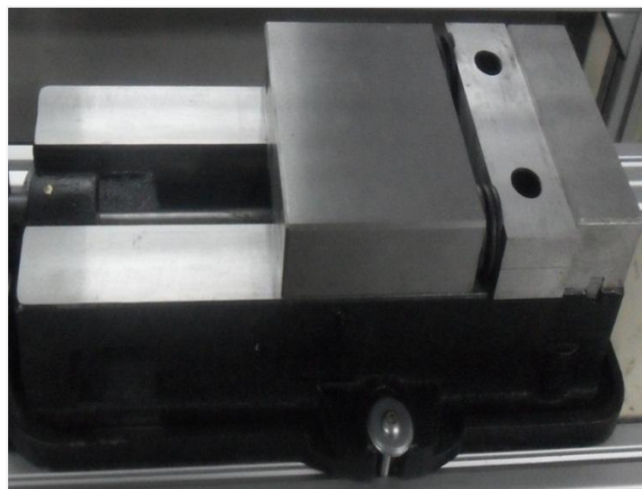


Figura 14. Base de los bloques deslizantes

De igual manera, el equipo está compuesto de flanches de fijación de muestras que permiten sostener y fijar los especímenes asfálticos a los bloques fijos que ejercen el desplazamiento de las muestras. La Figura 15 muestra las placas.

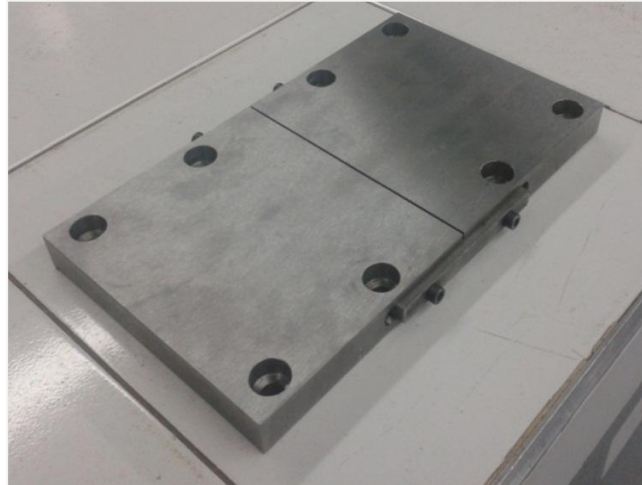


Figura 15. Flanches de fijación de muestras

Complementariamente, el equipo contempla una estructura soporte construida en su totalidad en aluminio extruido, de excelentes prestaciones mecánicas y presentación visual. En la Figura 16 se observa la estructura de soporte del equipo.



Figura 16. Estructura de soporte del equipo

4.1.2 Instrumentación eléctrica y electrónica

Con la finalidad de poder cuantificar las cargas y deformaciones en las muestras asfálticas ensayadas, se diseñó y desarrolló un sistema de medición adecuado que permitió controlar las condiciones de ensayo y medir la respuesta en deformación y carga de acuerdo al número de ciclos aplicados.

Para medir el desplazamiento lineal del tornillo, se instaló un transductor LVDT (Linear Variable Differential Transformer), con un recorrido igual a ± 50 mm. En la Figura 17 se puede observar el deformímetro.



Figura 17. Transductor diferencial lineal variable (LVDT)

La fuerza ejercida para el movimiento del bloque deslizante se midió con un sensor de fuerza tipo celda de carga basada en strain gauge (galgas extensométricas) en conexión puente de wiston, cuya capacidad de carga es del orden de 5000 libras. La Figura 18 presenta una imagen de la ubicación de la celda de carga en el Equipo de Reflexión.



Figura 18. Sensor de fuerza tipo celda

El equipo cuenta con un PLC que es un controlador lógico programable que tiene la función principal de generar los pulsos requeridos por el sistema de desplazamiento, para la rotación del motor a pasos mostrado en la Figura 19. Un computador procesa los pasos por segundo requeridos para el desplazamiento, y el PLC recibe mediante un protocolo de comunicación estándar el dato procesado.



Figura 19. Motor mecánico a pasos

Luego de recibir los pulsos en el PLC, fue necesario implementar un driver electrónico de potencia como el mostrado en la Figura 20, que recepcione y convierta dichos pulsos en potencia eléctrica, inyectando 1.8 amperios por paso.



Figura 20. Driver electrónico de potencia

Para suministrar de energía eléctrica al PLC se utilizó una fuente electrónica de alimentación. De igual manera, para controlar la temperatura en la cámara de ensayos se dispuso del controlador electrónico mostrado en la Figura 21.

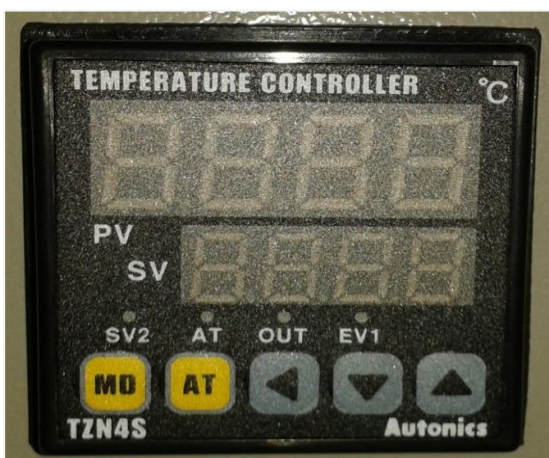


Figura 21. Control digital de temperatura

En lo referido a la temperatura de ensayo, se utilizó una resistencia que suministra la energía requerida para calentar la cámara a la temperatura definida por el usuario. El sistema posee ventilación forzada de aire para recirculación y homogenización interna de la temperatura. La Figura 22 presenta la resistencia de calentamiento que se conecta con el controlador por un contacto electrónico.



Figura 22. Resistencia para calentamiento de la cámara

Finalmente, se dispone de un computador de escritorio para asignar las variables de control de velocidad y frecuencia requerida por el usuario. La Figura 23 muestra el PC utilizado.



Figura 23. Computador de escritorio

4.1.3 Sistema de adquisición de datos y control

La adquisición de datos se realizó por medio de una tarjeta de marca National Instruments, donde la captura de la información fue proporcionada por los transductores de desplazamiento y carga. La lectura de las galgas extensométricas se registró con el módulo de alta precisión NI9237 que digitaliza las lecturas de fuerza y deformación. La Figura 24 presenta el módulo mencionado.

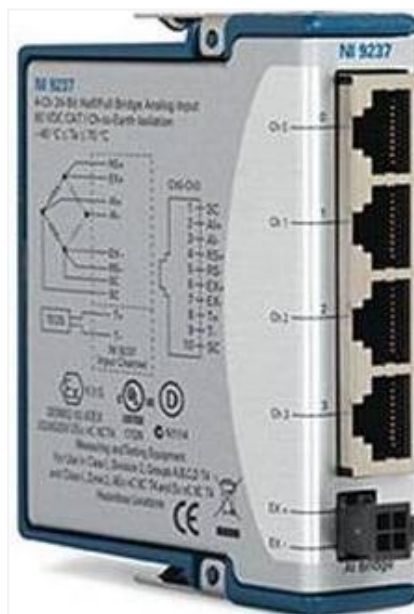


Figura 24. Tarjeta de adquisición de datos

4.1.4 Software de control

El software para el Equipo de Reflexión fue desarrollado utilizando la herramienta para control automático LabView desarrollado por National Instruments. Las variables de entrada para el control del ensayo son el porcentaje de disminución de la carga máxima, la amplitud y el período de la onda, el número de ciclos o repeticiones y la temperatura de ensayo. Como parámetros de salida el software

ofrece el tiempo de falla de las muestras, el número de ciclos aplicados, la carga máxima inicial y la carga actual, la temperatura de ensayo y el porcentaje de reducción de fuerza. A su vez, la Figura 25 muestra una vista del software, donde la gráfica superior representa la variación de la carga aplicada en función del tiempo, y la gráfica inferior corresponde a la señal de las deformaciones obtenidas durante el tiempo de ensayo conformando las ondas de forma triangular.

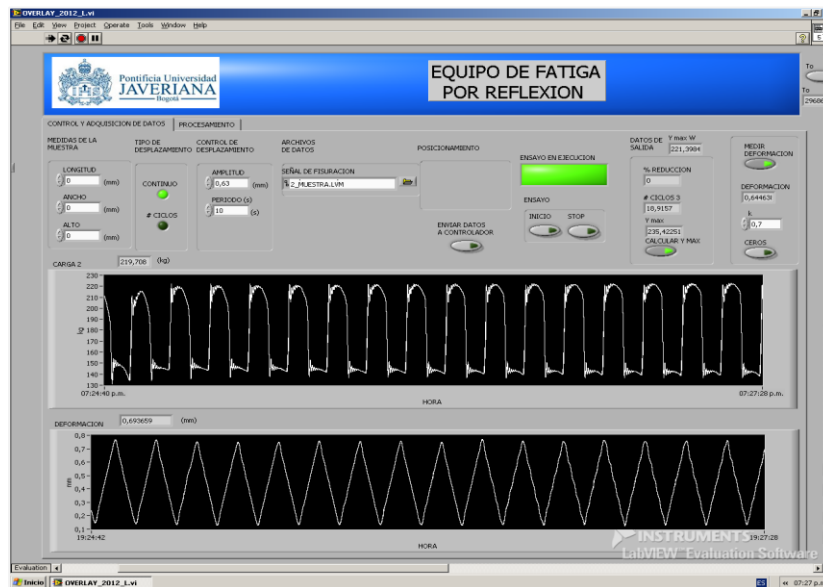


Figura 25. Software de control

Asimismo, en la interfaz gráfica se muestran botones de control para adquisición de datos, asignación de la velocidad y frecuencia de desplazamiento y el botón de comunicación con el PLC.

4.1.5 Resultados de la implementación

Para la implementación en laboratorio del Equipo de Reflexión se moldearon cilíndricamente tres briquetas asfálticas con el Compactador Giratorio Superpave, de diámetro de 150 mm y altura de 11.5 mm.

Seguidamente, se colocó la plantilla de corte sobre la superficie superior de los especímenes moldeados y se trazó la ubicación de los dos primeros cortes para retirar los bordes cortando perpendicularmente sobre la superficie superior siguiendo las líneas trazadas. Luego, se retiró equitativamente la parte superior e inferior del espécimen para obtener una muestra con una altura de 38 mm.

Se colocaron y aseguraron las placas base en el dispositivo de montaje, se cubrió con epóxico la parte inferior de los especímenes cortados y se pegaron sobre las placas base. Luego, se colocó un peso de 4.5 kg sobre la parte superior del espécimen pegado para asegurar el contacto completo del espécimen cortado con las placas base.

Se colocó la muestra de ensayo ensamblada dentro de la cámara de temperatura del Equipo de Reflexión a 25 °C durante una hora antes del ensayo, se ingresaron los parámetros de amplitud y período en el software desarrollado y realizó el ensayo midiendo el desplazamiento en función del tiempo y la reducción de la fuerza con el número de ciclos aplicados.

En el Anexo A se presenta de manera detallada el procedimiento de ensayo para la determinación de la resistencia a la fatiga de mezclas asfálticas.

A continuación, en la Figura 26 y la Figura 27 se muestran los especímenes asfálticos antes y después del ensayo, en este último caso se observa la fatiga del material bituminoso debido al reflejo de la discontinuidad existente entre las placas base como consecuencia de los ciclos de apertura y oclusión del equipo.



Figura 26. Montaje de muestras en el equipo

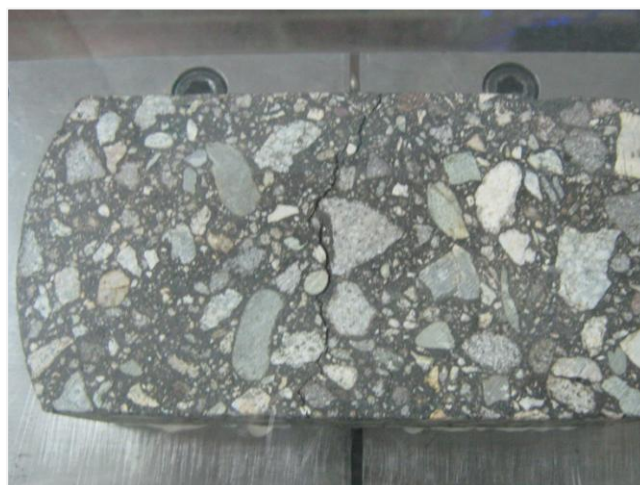


Figura 27. Fatiga en briqueta asfáltica

En general, las primeras pruebas realizadas permitieron evaluar el nivel de deformación constante en el ensayo y comprobar el comportamiento decreciente de la carga máxima en el tiempo, de igual manera, el cumplimiento de la frecuencia y temperatura ingresadas así como la evolución de la fatiga por reflexión causada por el reflejo de las discontinuidades inferiores.

En el Anexo B se presenta el respectivo manual de usuario del Equipo de Reflexión que detalla paso a paso su procedimiento de operación.

4.2 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

En sentido general, los agregados también llamados áridos, son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que mezclados con el cemento asfáltico conforman un todo compacto conocido como mezcla asfáltica. Para fines de diseño, se clasifica en agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz No. 4, agregado fino a la porción comprendida entre los tamices No. 4 y No. 200 y llenante mineral la que pase el tamiz No. 4.

4.2.1 Especificaciones del agregado

De acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en el Artículo 400-96: "Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos" en la sección 400.2.1 de Agregados y Llenante Mineral, se exponen las especificaciones para los agregados mencionadas a continuación.

Los agregados pétreos no deben desprenderse de la capa de material asfáltico debido a la acción del agua y del tránsito. Asimismo, el agregado grueso debe proceder de la trituración de roca o de grava y sus fragmentos deben ser limpios, resistentes y durables. A su vez, el agregado fino debe estar constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural y los granos deben ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. De igual manera, el llenante mineral debe provenir de procesos de trituración o puede usarse cal hidratada o cemento.

La mezcla de los agregados grueso y fino y el llenante mineral deberá satisfacer los requisitos básicos de calidad indicados en la Tabla 400.1". Esta tabla se presenta en la Figura 28 de este documento.

Tipo de Tto. ó mezcla	Part. Frac. Mec (Agreg. Grueso)	Desgaste Los Angeles	Pérd. en ensayo de solidez sulf. de sodio	Adhesividad				Inmersión - compresión	Índice Aplana. y Alarg.	Coef. Pulim. Aceler.	I.P.	Equiv. de arena
				Sulf. de magnesio	Riedel Webber	Stripping	Bandeja					
Norma IIV	E - 227	E - 218/219	E - 220	E - 220	E - 774	E - 737	E - 740	E - 738	E - 230	E - 232	E - 125/ 126	E - 133
SELLO DE ARENA ASFALTO				12% máx.	18% máx.	4 mín					N.P.	50% mín.
TTO. SUPERF. SIMPLE Y DOBLE	75% mín	40% máx.	12% máx.	18% máx.			80% mín.		35% máx.	0.45 mín.		
LECHADA ASFALTICA		35% máx.	12% máx.	18% máx.	4 mín						N.P.	50% mín.
MEZCLA ABIERTA EN FRIO		75% mín.	35% máx (base) 30% máx. (rodadura)	12% máx.	18% máx.		95% mín.		35% máx.	0.45 mín. (rodadura)		
MEZCLA DENSA EN FRIO		40% máx. (base) 30% máx. (rodadura)	12% máx.	18% máx.								
- Agregado grueso	75% mín.		12% máx.	18% máx.								
- Agregado fino			12% máx.	18% máx.								
- Gradación combinada												
MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE		75% mín	35% máx	12% máx.	18% máx.		95% mín	75% mín			N.P.	50% mín.
MEZCLA DENSA EN CALIENTE		40% máx. (base) 30% máx. (rodadura)	12% máx.	18% máx.								
- Agregado grueso	75% mín.		12% máx.	18% máx.								
- Agregado fino			12% máx.	18% máx.								
- Gradación combinada												
RECICLADO DEL PAVIMENTO EXISTENTE (material de adición)	50% mín	40% máx	12% máx.	18% máx.							N.P.	30% mín en frío, 50% mín en caliente.

Figura 28. Requisitos de los agregados para tratamientos y mezclas bituminosas

Fuente: INVIAS (2007), Tabla 400.1

4.2.2 Agregado pétreo utilizado

Se caracterizaron los agregados provenientes de una cantera representativa de la ciudad de Villavicencio. Estos agregados fueron de la mejor calidad posible dentro de los tipos normalmente utilizados para pavimentos asfálticos en la ciudad de Bogotá.

La mezcla de agregados grueso y fino, y del llenante mineral, se ajustó a las exigencias de la especificación INVIAS para una granulometría de mezcla asfáltica densa en caliente tipo MDC-2.

4.2.3 Ensayos realizados al agregado

Se realizaron los ensayos de caracterización a los agregados pétreos, según las normas técnicas establecidas por el INVIAS en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras - Tomo II; asimismo, se realizaron los ensayos de consenso y de origen para agregados, requeridos por la metodología de diseño de mezclas SUPERPAVE.

4.2.3.1 Ensayos convencionales al agregado pétreo

A continuación se listan los ensayos convencionales y SUPERPAVE realizados al agregado pétreo. Los procedimientos con los cuales se realizaron los ensayos corresponden a las normas INVIAS.

- Equivalente de arena de suelos y agregados finos
- Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles

- Sanidad de los agregados frente a la acción de las soluciones de sulfato de sodio o de magnesio
- Porcentaje de caras fracturadas en los agregados
- Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras
- Valor de azul de metileno en agregados finos y en llenantes minerales
- Determinación de la resistencia del agregado grueso al desgaste por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval
- Método para determinar partículas planas, alargadas, o planas y alargadas en agregados gruesos

4.2.3.2 Ensayos adicionales al agregado pétreo

Para realizar el diseño volumétrico de mezclas por la metodología SUPERPAVE fue necesario realizar los ensayos de gravedad específica en agregados gruesos, agregados finos y llenantes minerales.

Para el caso del agregado grueso se buscó determinar las gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción, después que los agregados con tamaño igual o mayor al tamiz No. 4 estuvieron sumergidos en agua durante 15 horas. De igual manera, para el agregado fino se determinaron las gravedades específicas bulk y aparente a 23 °C después de 15 horas en agua, así como la absorción de agregados finos.

En lo referido al llenante mineral, se determinó la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral (filler) por medio del método del picnómetro, para suelos compuestos sólo de partículas menores que el tamiz No. 200. El objetivo fue conocer la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura.

Los equipos y los procedimientos con los cuales se realizaron los ensayos corresponden a las normas INVIAS.

La Tabla 2 presenta la comparación entre los valores especificados en las normas INVIAS y los resultados de los ensayos de caracterización realizados al agregado.

Tabla 2. Ensayos realizados sobre el agregado pétreo

Característica del ensayo	Unidad	Norma INV	Especificación INVIAS		Resultados
			Mín	Máx	
Gravedad específica del llenante mineral	-	E-128-07	-	-	2.73
Equivalente de arena	%	E-133-07	50	-	58
Desgaste Los Ángeles	%	E-218-07	-	25	28.6
Pérdidas en ensayo de solidez Sulfato de magnesio	%	E-220-07	-	18	4.1
Gravedad específica y absorción de agregado fino	-	E-222-07	-	-	2.48/1.7
Gravedad específica y absorción de agregados gruesos	-	E-223-07	-	-	2.59/1.6
Partículas fracturadas mecánicamente	%	E-227-07	85	-	87.7
Índice de alargamiento y aplanamiento	%	E-230-07	-	35 ⁽¹⁾	21.1
Valor de azul de metileno	%	E-235-07	-	10 ⁽¹⁾	4.8
Desgaste Micro-Deval	%	E-238-07	-	20	10.4
Partículas planas y alargadas (Relación 5:1)	%	E-240-07	-	10	1.4

(1) Valores especificados para bases y subbases granulares.

En el ANEXO C se presenta detalladamente los resultados de laboratorio correspondientes a los ensayos de caracterización del agregado pétreo.

4.3 CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO ORIGINAL

El asfalto se define como un material de color oscuro, que puede tener consistencia líquida, semisólida o sólida, compuesto principalmente de hidrocarburos casi en su totalidad, solubles en sulfuro de carbono. Proceden de yacimientos naturales o como residuo de la refinación de determinados crudos de petróleo, y se emplean en el campo de la ingeniería debido entre otras cosas a sus buenas propiedades adhesivas o aglutinantes, mecánicas, físicas y su elevada inercia química.

4.3.1 Especificaciones del cemento asfáltico

De acuerdo a las especificaciones del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en el Artículo 400-96: "Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos" en la sección 400.2.2 de Cemento Asfáltico, se exponen las especificaciones para el cemento asfáltico mencionadas a continuación.

El cemento asfáltico a emplear en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente puede ser de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía. La Tabla 3 presenta estas recomendaciones según la Tabla 400.2 de la Normatividad INVIAS.

Asimismo, los requisitos de calidad del cemento asfáltico se establecen en la Tabla 400.3. de la norma y se exponen para cada tipo de asfalto en la Tabla 4.

Tabla 3. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente

Tránsito de diseño 10 ⁶ ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24 °C +	15-24 °C	15 °C
5 +	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Fuente: INVIAS (2007), Tabla 400.2

Tabla 4. Especificaciones del cemento asfáltico

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

Fuente: INVIAS (2007), Tabla 400.3

De igual manera, la norma contempla la modificación del cemento asfáltico mediante la adición de activantes, rejuvenecedores, polímeros, asfaltos naturales o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. En tales casos las especificaciones particulares establecen el tipo de adición y las especificaciones que deben cumplir tanto el ligante modificado como las mezclas asfálticas resultantes.

4.3.2 Cemento asfáltico utilizado

Para el presente proyecto se utilizó el cemento asfáltico de Barrancabermeja clasificado por penetración como 80-100, el cual se caracterizó inicialmente para conocer sus propiedades en estado original y luego, en puntos posteriores, se modificó por proceso húmedo, con el fin de estudiar las modificaciones que el grano de caucho reciclado (GCR) produce en el mismo al ser combinados y en la mezcla asfáltica resultante.

4.3.3 Ensayos realizados al cemento asfáltico

Para evaluar la calidad del cemento asfáltico y caracterizarlo, existen diversos ensayos de laboratorio que tratan de reproducir el comportamiento a escala real del material. A continuación se presentan los ensayos realizados al ligante y las normas que los rigen.

4.3.3.1 Viscosidad rotacional Brookfield

Este ensayo de consistencia tiene por objeto medir la viscosidad aparente del asfalto a elevadas temperaturas, desde 60 °C a 200 °C, usando un viscosímetro rotacional equipado con una cámara termostatzada de tipo Brookfield Termosel.

El ensayo de viscosidad Brookfield es muy importante porque permite conocer el comportamiento reológico del material asfáltico a diferentes temperaturas, asimismo, permite determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en caliente, para los criterios de 0.17 ± 0.02 Pa·s y 0.28 ± 0.03 Pa·s respectivamente, establecidos por SUPERPAVE y que se analizarán a detalle más adelante.

El procedimiento empleado para la ejecución de este ensayo se encuentra en la Norma INV E-717-07. La Figura 29 representa la curva reológica obtenida para el ligante, la cual muestra la variación de la viscosidad Brookfield en función de la temperatura de ensayo.

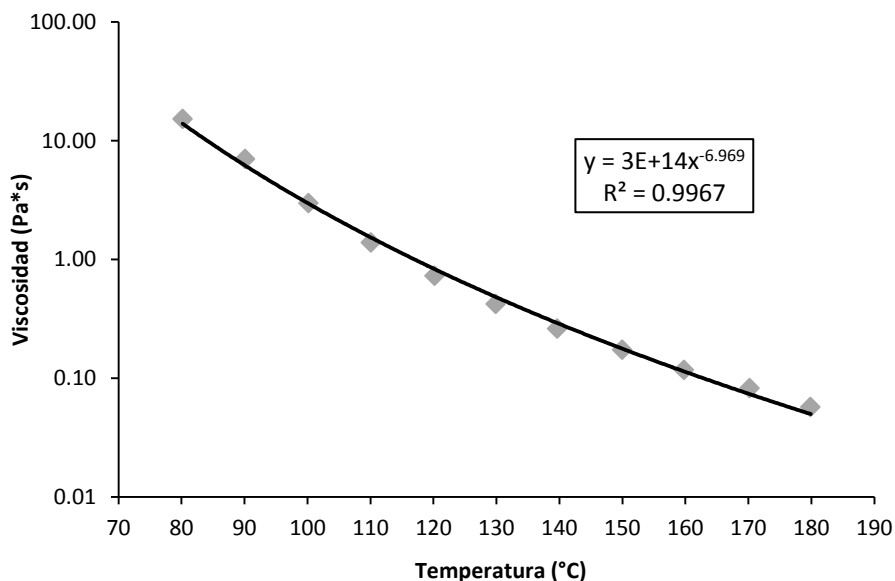


Figura 29. Curva reológica para el ligante asfáltico

4.3.3.2 Ensayos convencionales al cemento asfáltico

A continuación se listan los ensayos convencionales realizados al ligante asfáltico, tanto en su estado original como envejecido. Los procedimientos con los cuales se realizaron los ensayos corresponden a las normas INVIAS.

- Ductilidad de los materiales asfálticos
- Penetración de los materiales asfálticos
- Gravedad específica de materiales asfálticos por el método del picnómetro
- Punto de ignición y de llama mediante la copa abierta Cleveland
- Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)

- Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento
- Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento
- Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento

En la Tabla 5 se hace una comparación de los valores especificados para estos parámetros según la normatividad INVIAS y los resultados de los ensayos de caracterización realizados al asfalto 80-100.

Tabla 5. Ensayos realizados sobre el cemento asfáltico 80-100

Característica del ensayo	Unidad	Norma de ensayo	Especificación INVIAS		Resultados
			Mín	Máx	
Ductilidad (25 °C, 5 cm/min)	cm	INV E-702-07	100	-	> 100
Penetración (25 °C, 100 g, 5 s)	0.1 mm	INV E-706-07	80	100	83.2
Gravedad específica mediante método del picnómetro	-	INV E-707-07	-	-	1.007
Punto de ignición mediante copa abierta de Cleveland	°C	INV E-709-07	230	-	358
Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola	°C	INV E-712-07	-	-	50.6
Índice de penetración	-	INV E-724-07	-1	+1	0.26
Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163 °C, 75 minutos)	%	INV E-720-07	-	1.0	0.30
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento, en % de la penetración original	%	INV E-706-07	48	-	60.8
Incremento en el punto de ablandamiento luego de la pérdida por calentamiento en película delgada en movimiento	°C	INV E-712-07	-	5	4.0

En el ANEXO D se presenta detalladamente los resultados de laboratorio correspondientes a los ensayos de caracterización del cemento asfáltico 80-100.

4.4 CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON CAUCHO

El objeto de modificar el ligante con Grano de Caucho Reciclado (GCR) es el de aumentar el intervalo de temperatura de desempeño y resistencia al envejecimiento del material, obtener mejores propiedades elásticas y mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas elaboradas con el ligante modificado.

La mezcla asfáltica con cemento asfáltico modificado con GCR se utilizó para poner a prueba el equipo de fatiga por reflexión construido y comparar los resultados obtenidos con la mezcla asfáltica convencional (MDC-2). Se esperó, por ser la mezcla con GCR más resistente a la fatiga, la obtención de mayores ciclos de deformación con respecto a la mezcla sin GCR.

La modificación del ligante con GCR se llevó a cabo, por vía húmeda, siguiendo la Especificación del Instituto de Desarrollo Urbano IDU para la aplicación del Grano de Caucho Reciclado (GCR) en mezclas asfálticas en caliente.

4.4.1 Granulometría del caucho

El GCR utilizado en la modificación del ligante fue uniforme y estuvo libre de contaminantes. De acuerdo con la especificación del IDU, todo el GCR tuvo un tamaño inferior a 0.60 mm (pasante del tamiz No. 30). En la Tabla 6 se presenta la granulometría utilizada para modificar el ligante de Barrancabermeja.

Tabla 6. Granulometría del GCR utilizada en la modificación del cemento asfáltico

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alternativo	
595 um	No. 30	100
297 um	No. 50	7.5
74 um	No. 200	1.5

4.4.2 Cantidad óptima de caucho

La cantidad óptima de GCR es aquella que proporcione a la mezcla asfalto-caucho una viscosidad Brookfield a 163°C entre 1.5 Pa·s y 3.0 Pa·s después de un determinado tiempo y temperatura de mezclado. Las especificaciones del IDU recomiendan un porcentaje entre el diez (10) y veinte (20) por ciento de GCR respecto al peso total del asfalto modificado.

4.4.3 Procedimiento para modificar el ligante

Se trabajó con el cemento asfáltico de clasificación 80-100, de Barrancabermeja, y un único porcentaje de adición de caucho con relación al peso total de la mezcla asfalto-caucho, según recomendación del estudio realizado por el Instituto de Desarrollo Urbano (2002). Otras dos variables fueron el tiempo de reacción del caucho con el asfalto y la temperatura de mezclado del asfalto-caucho, de las cuales se comentará más adelante.

Se utilizó un porcentaje del 15% para el ligante asfáltico, logrando la viscosidad buscada. La selección de este porcentaje de caucho se basó en las experiencias registradas para este proceso, las cuales muestran que la cantidad requerida de GCR para modificar el ligante se encuentra entre el 10% y 20%.

Las temperaturas de mezclado analizadas fueron de 160 °C y 170 °C, ya que según la literatura revisada, el caucho reacciona con el cemento asfáltico en un intervalo de temperaturas entre los 150 °C y 205 °C. Se escogieron temperaturas bajas con el objeto de evitar el daño del ligante por sobrecalentamiento. Los tiempos de reacción seleccionados fueron de 55, 60, 65, 70 y 75 minutos, puesto que la experiencia ha demostrado que el caucho debe reaccionar con el cemento

asfáltico un tiempo mínimo de 55 minutos hasta una o dos horas. La energía de agitación la estableció el equipo modificador, y fue de 500 rpm.

Se elaboraron mezclas asfalto-caucho para cada temperatura de ensayo. La variable tiempo de reacción se controló tomando muestras durante el proceso de mezclado en el tiempo requerido por el diseño. Seguidamente, se seleccionó la mejor mezcla asfalto-caucho teniendo en cuenta el criterio de viscosidad Brookfield a 163 °C, el tiempo de reacción y la temperatura de mezclado.

4.4.4 Ensayos realizados al ligante modificado

En similitud al ligante original, se sometió el asfalto modificado a ensayos de caracterización, detallados a continuación:

4.4.4.1 Viscosidad rotacional Brookfield

La medición de la viscosidad es requerida, entre otros parámetros, para investigar la capacidad de bombeo del ligante modificado con GCR. Si la viscosidad es demasiado baja pueden ocurrir inconvenientes de flujo de la mezcla asfalto-caucho, y si es demasiado alta no podrá ser bombeada. La adición de caucho al cemento asfáltico causa un aumento en la viscosidad del asfalto resultante, por consiguiente a cada una de las mezclas asfalto-caucho se les realizaron ensayos de viscosidad rotacional Brookfield. Según las especificaciones del IDU, el parámetro de la viscosidad Brookfield a 163°C debe usarse para evaluar el ligante modificado con GCR, y su valor debe estar entre 1.5 Pa·s y 3.0 Pa·s

La Tabla 7 muestra los valores de viscosidad obtenidos en el intervalo de tiempo buscado, para la combinación de diseño.

Tabla 7. Resultados de viscosidad Brookfield con 15% de caucho a 170°C

Parámetro	Viscosidad Brookfield (Pa*s)				
Código B-15-170	1.930	2.021	2.367	2.233	1.972
Tiempo (min)	55	60	65	70	75

Los valores de viscosidad expuestos en la Tabla 7, corresponden al promedio de las tres últimas viscosidades tomadas después de diez minutos requeridos para que la mezcla asfalto-caucho se estabilizara térmicamente. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-717-07.

En la Figura 30 se puede observar que todos los tiempos de mezclado en el diseño a 170 °C tuvieron un valor de viscosidad dentro del intervalo deseado.

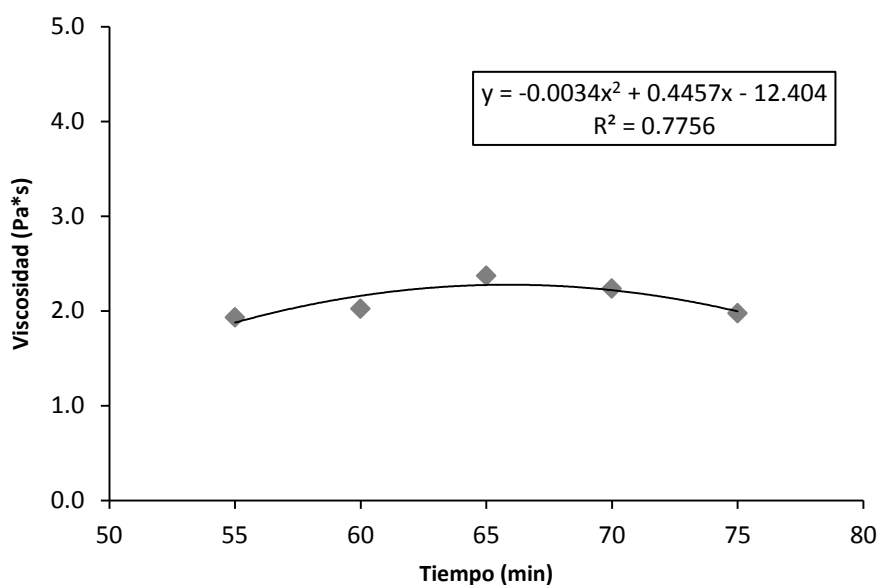


Figura 30. Variación de la viscosidad con el tiempo de reacción a 170°C

De acuerdo a los resultados anteriores se escogió el cemento asfáltico de diseño B-15-170-60 que corresponde a un ligante con 15% de caucho, en el cual el cemento asfáltico reaccionó con el caucho a una temperatura de 170 °C durante 60 minutos.

Este diseño se seleccionó porque presenta un valor de viscosidad entre 1.5 y 3.0 Pa·s y porque la variación de la viscosidad con los tiempos de reacción analizados se mantiene dentro del intervalo especificado. De igual manera, dado que los valores de viscosidad para la temperatura de 170 °C se encuentran en el intervalo buscado, se escogió el diseño B-15-170-60 por presentar un valor de viscosidad aceptable en el menor tiempo.

4.4.4.2 Curva reológica del ligante modificado

Las viscosidades Brookfield del ligante modificado con GCR son mucho más altas que la del ligante sin modificar, esto se debe a que el caucho cambia las propiedades de la mezcla resultante tanto por la adición del mismo como por el proceso de modificación al someter el ligante a altas temperaturas por largos períodos de tiempo.

A una temperatura aproximada de 120 °C la tendencia de la curva que muestra la variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura cambia en el ligante con GCR respecto a la tendencia que mostraba el ligante antes de ser modificado, esto puede deberse a que a bajas temperaturas la viscosidad medida es la de la mezcla asfalto-caucho y a altas temperaturas es la de las partículas de caucho dispersas en el ligante que presenta poca viscosidad.

La Figura 31 representa la curva reológica obtenida para el ligante modificado con GCR, la cual muestra la variación de la viscosidad Brookfield en función de la temperatura de ensayo.

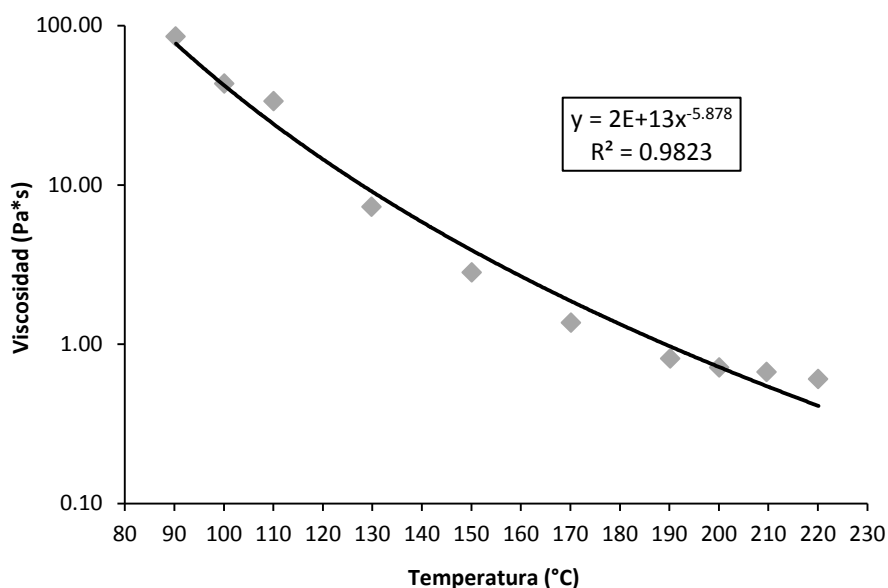


Figura 31. Curva reológica del cemento asfáltico modificado con GCR

4.4.4.3 Otros ensayos de caracterización

A continuación se listan los ensayos convencionales realizados al ligante modificado con GCR, tanto en su estado original como envejecido. Los procedimientos con los cuales se realizaron los ensayos corresponden a las normas INVIAS.

- Penetración del cemento asfáltico
- Punto de ablandamiento con aparato de anillo y bola
- Gravedad específica por el método del picnómetro
- Viscosidad rotacional Brookfield a 163 °C, curva reológica
- Pérdida de masa por calentamiento en película delgada
- Penetración residual del cemento asfáltico
- Recuperación elástica utilizando el ductilómetro

La Tabla 8 presenta los resultados de los ensayos convencionales de caracterización, comparados con los valores exigidos por las especificaciones IDU.

Tabla 8. Ensayos realizados sobre el ligante asfáltico modificado con GCR

Ensayo	Unidad	Norma de ensayo	Resultado	Especificación IDU	
				Mínimo	Máximo
Asfalto original ya modificado con GCR					
Viscosidad a 163 °C con viscosímetro rotacional	Pa-s	INV E-717-07	2.021	1.5	3.0
Penetración a 25 °C	1/10 mm	INV E-706-07	70.3	40	70
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712-07	55.3	-	55
Gravedad específica		INV E-707-07	1.023	-	-
Residuo después de RTFOT					
Pérdida de masa	%	INV E-720-07	0.373	-	1
Penetración (% de la penetración original)	%	INV E-706-07	71.4	65	-
Recuperación elástica utilizando el ductilómetro	%	INV E-742-07	59.0	50	-

En el ANEXO E se presenta detalladamente los resultados de laboratorio correspondientes a los ensayos de caracterización del asfalto modificado con GCR.

4.4.5 Cantidad óptima de ligante modificado con GCR

La cantidad requerida de cemento asfáltico modificado con GCR para la mezcla asfáltica se determinó mediante la metodología SUPERPAVE. Se compactaron cuatro probetas en la máquina de compactación giratoria SGC y se evaluó el porcentaje de vacíos con aire para encontrar la cantidad óptima de ligante modificado correspondiente al 4.0%. Los criterios de aceptación recomendado por SUPERPAVE para encontrar la cantidad óptima de ligante modificado con GCR se detallan en el siguiente capítulo.

4.5 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

El diseño volumétrico de la mezcla juega un rol importante en el diseño de mezclas por la metodología SUPERPAVE. La información presente en el siguiente proceso de ensayos y análisis de datos corresponde al nivel uno de diseño de mezclas, y engloba cuatro pasos básicos en los ensayos y procesos de análisis:

- Selección de los materiales (agregado y ligante),
- Selección de la estructura de agregado de diseño,
- Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño,
- Evaluación de la susceptibilidad a la humedad de la mezcla diseñada.

La selección de los materiales consiste en la determinación del tránsito y factores ambientales para el proyecto. A partir de ellos se selecciona el grado de desempeño (PG) del ligante asfáltico requerido para el pavimento. Las exigencias a cumplir por el agregado se determinan en función del nivel de tránsito y de la posición del material en la estructura del pavimento. Los materiales son seleccionados con base en su capacidad para superar los criterios establecidos.

La selección de la estructura de agregado de diseño es un proceso de prueba y error. Para este trabajo, los agregados se mezclaron en porcentajes que satisfagan la granulometría tipo MDC-2 establecida por el Instituto de Vías INVIAS. La mezcla de diseño propuesta es considerada aceptable si presenta propiedades volumétricas adecuadas para las condiciones de tránsito y medio ambiente.

La selección del contenido de ligante asfáltico de diseño consiste en la variación de la cantidad del ligante asfáltico a mezclarse con la estructura de agregado de diseño para obtener sus propiedades volumétricas y de compactación que satisfagan los criterios de diseño de la mezcla. Este paso permite observar la sensibilidad de las propiedades volumétricas y de compactación de la estructura del agregado de diseño en relación con el contenido de ligante asfáltico de diseño.

La evaluación de susceptibilidad o sensibilidad a la humedad consiste en ensayar la mezcla de diseño según la norma INV E-725-07 para determinar si la mezcla es susceptible a daño por acción del agua.

A continuación se presenta el diseño de dos mezclas asfálticas densas para rodadura, la primera de ellas referida a una mezcla convencional tipo MDC-2 según la clasificación del INVIAS, y la segunda, a una mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR). En el ANEXO F y el ANEXO G se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados para el diseño de la mezcla asfáltica tipo MDC-2 y de la mezcla modificada con caucho respectivamente.

4.5.1 Selección de los materiales

Se definió el número de ejes simples equivalentes para el carril de diseño correspondiente a la categoría de 30 a 100 millones. Este nivel de tránsito se empleó para determinar los requerimientos de diseño tales como número de giros de diseño para la compactación, propiedades físicas exigidas al agregado y requerimientos volumétricos de la mezcla. El nivel que se seleccionó para el diseño de la mezcla fue el Nivel 1, correspondiente a la determinación de sus propiedades volumétricas, para la mezcla de agregados con tamaño máximo nominal de 12.5 mm.

4.5.1.1 Selección del ligante

Con base en los resultados del ensayo de viscosidad se determinaron las temperaturas de mezclado y de compactación en laboratorio y se estableció el intervalo de temperatura de mezclado entre 158 °C y 162 °C y el intervalo de compactación entre 137 °C y 142 °C, para los criterios de 0.17 ± 0.02 Pa·s y 0.28 ± 0.03 Pa·s, respectivamente. La Figura 32 presenta la curva reológica obtenida para el cemento asfáltico 80-100.

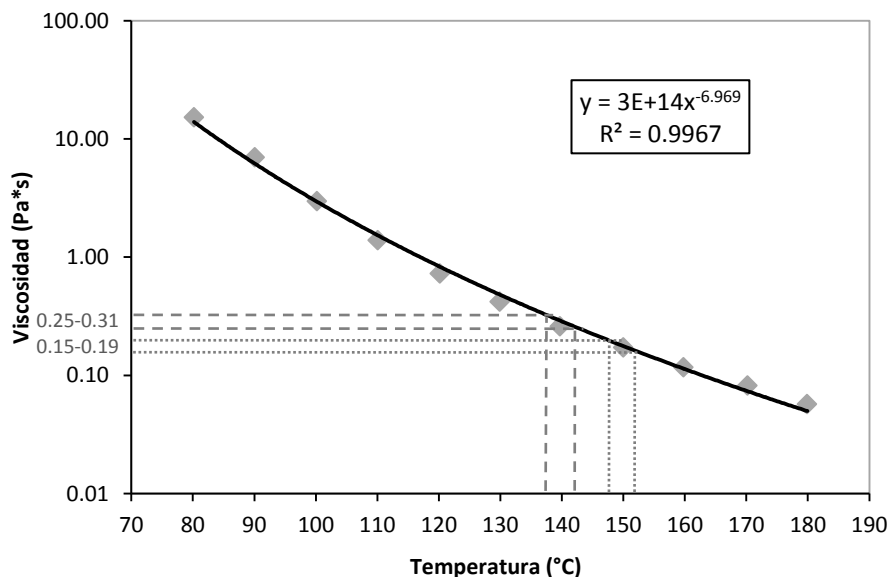


Figura 32. Curva reológica para el cemento asfáltico 80-100

4.5.1.2 Selección del agregado

La metodología SUPERPAVE requirió la realización de ensayos concernientes a las propiedades de consenso y de origen de los agregados. Los ensayos exigidos fueron: partículas alargadas y aplanadas, equivalente de arena, desgaste en máquina de Los Ángeles e intemperismo acelerado (resistencia al ataque de sulfatos). Además, se realizaron otros ensayos de caracterización importantes sobre los agregados para el conocimiento de sus propiedades. En la Tabla 9 se indican los criterios exigidos para cada uno de los ensayos solicitados.

Tabla 9. Propiedades de consenso y de origen de los agregados pétreos

Propiedad	Criterio
Partículas alargadas y aplanadas	10% máx.
Equivalente de arena	50% mín.
Desgaste de Los Ángeles	35% máx.
Intemperismo acelerado	10% máx.

Fuente: Strategic Highway Research Program (1994)

Asimismo, se determinaron las gravedades específicas de los agregados gruesos y finos para la determinación de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica diseñada.

4.5.2 Selección de la estructura de agregado de diseño

Para seleccionar la estructura de agregado de diseño, se calculó la granulometría de la mezcla por medio de combinaciones matemáticas de las granulometrías individuales de los materiales. La granulometría de la mezcla fue luego comparada con los requerimientos de la especificación para los tamices correspondientes. La granulometría de control se basó en cuatro tamices de control: el máximo, el máximo nominal, el de apertura igual a 2.36 mm (No. 8) y el de apertura de 75 μm (No. 200).

El tamiz máximo nominal es un tamaño mayor que el primer tamiz que retiene más del 10% del agregado combinado. La zona restringida es un área cuyos límites están a ambos lados de la línea de máxima densidad. Para una mezcla con tamaño nominal de 12.5 mm, esta inicia en el tamiz de 2.36 mm (No. 8) y se extiende hasta el tamiz de 300 μm (No. 50).

Al variar el tamaño máximo nominal de la mezcla, los valores mínimo y máximo requeridos para los tamices de control, así como también la zona restringida cambian. La Tabla 10 indica los requerimientos granulométricos para la estructura de agregado de diseño.

Tabla 10. Criterio granulométrico para una mezcla nominal de 12.5 mm

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

Fuente: Strategic Highway Research Program (1994)

Cualquier granulometría propuesta para la mezcla debe pasar entre los puntos de control establecidos sobre los cuatro tamices, y por fuera del área restringida. Asimismo, la granulometría también cumplió con el criterio del Instituto Nacional de Vías INVIAS para una mezcla asfáltica tipo MDC-2 (Tabla 11). En la Figura 33 se muestran los requerimientos granulométricos para una mezcla nominal de 12.5 mm.

Las proporciones de la mezcla apuntan a lograr una gradación cerrada, cerca de la línea de máxima densidad, y distante de los límites de los tamices de control o de la zona restringida; de igual manera tienden a ser el valor medio de los intervalos INVIAS cumpliendo el requisito anterior. La granulometría final de diseño se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Granulometría de diseño para la mezcla asfáltica MDC-2

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

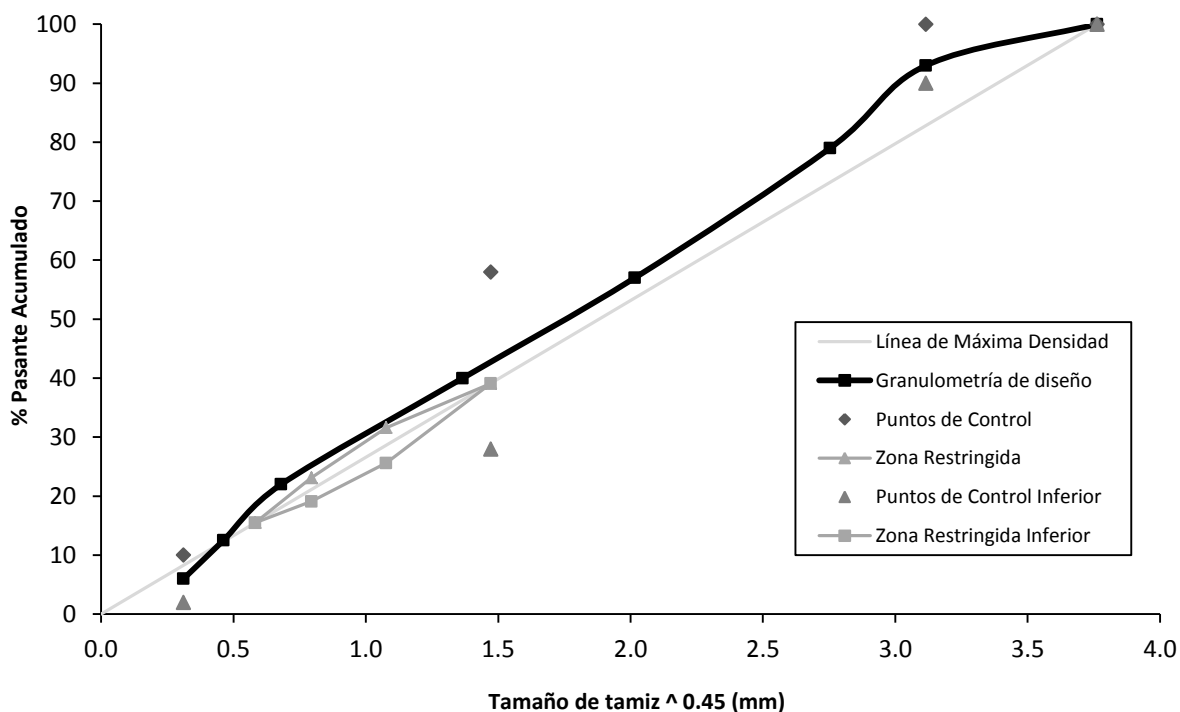


Figura 33. Granulometría de la mezcla asfáltica MDC-2

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

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

Tabla 12. Propiedades de la mezcla de agregados pétreos

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

Con base en los resultados anteriores, se consideró la muestra aceptable y se definió como la estructura de agregado de diseño. El siguiente paso consistió en la evaluación de la mezcla de diseño mediante la compactación de especímenes y la determinación de sus propiedades volumétricas. Se compactaron dos especímenes con el Compactador Giratorio SUPERPAVE (SGC) y se determinó el contenido de ligante asfáltico para la mezcla, estimando el peso específico efectivo de la mezcla y empleando los cálculos que se muestran a continuación. La gravedad específica efectiva de la mezcla (G_{se}) se estimó con:

$$G_{se} = G_{sb} + 0.8(G_{sa} - G_{sb})$$

$$G_{se} = 2.583 + 0.8(2.647 - 2.583) = 2.625$$

El volumen de ligante asfáltico (V_{ba}) absorbido en el agregado se estimó con:

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

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

Donde:

P_b : Porcentaje de ligante (se ha supuesto 0.05),

P_s : Porcentaje de agregado (se ha supuesto 0.95),

G_b : Gravedad específica del ligante (1.007 de laboratorio),

V_a : Volumen de vacíos de aire (se fija un valor de $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$).

El volumen de ligante efectivo (V_{be}) se determinó a partir de la ecuación:

$$V_{be} = 0.081 - 0.02931[\ln S_n]$$

$$V_{be} = 0.081 - 0.02931 \ln 0.5 = 0.101 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Donde S_n es el tamaño del tamiz máximo nominal del agregado (en pulgadas).

Finalmente, el contenido de prueba inicial de ligante asfáltico (P_{bi}) se calculó con:

$$P_{bi} = \frac{G_b(V_{be} + V_{ba})}{G_b V_{be} + V_{ba} + W_s} \cdot 100$$

$$P_{bi} = \frac{1.007(0.101 + 0.0290)}{1.007(0.101 + 0.0290) + 2.216} \cdot 100 = 5.6\%$$

Donde W_s es el peso del agregado en gramos y se definió con la ecuación:

$$W_s = [P_s(1 - V_a)] / (P_b/G_b + P_s/G_{se})$$

$$W_s = [0.95(1 - 0.04)] / (0.05/1.007 + 0.95/2.625) = 2.216 \text{ g}$$

A continuación se compactó con el SGC dos especímenes para la mezcla de diseño, mientras que un tercer espécimen fue preparado para la determinación de la gravedad específica máxima teórica de la mezcla (G_{mm}). La norma que determinó las cantidades mínimas del material de ensayo fue la AASHTO T209.

Los especímenes se mezclaron a temperatura apropiada, es decir, entre 148 °C y 152 °C para el ligante asfáltico, según la curva reológica obtenida. Los especímenes se sometieron luego a un envejecimiento de corto plazo, donde la mezcla suelta sobre una bandeja plana fue colocada en un horno a 135 °C durante 4 horas. Seguidamente, se llevaron los especímenes al intervalo de temperatura de compactación (137 °C - 142 °C), ubicándolos en otro horno durante un tiempo corto, generalmente menos de 30 minutos.

Finalmente, se compactaron los especímenes o se dejaron enfriar, en este caso, para la determinación de G_{mm} . El número de giros para la compactación se determinó en función de la temperatura promedio del aire para diseño (en el caso de Bogotá 15 °C aproximadamente) y el nivel de tránsito (penúltimo intervalo). La Tabla 13 indica el número de giros requeridos.

Tabla 13. Número de giros del compactador giratorio SUPERPAVE

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

Fuente: Strategic Highway Research Program (1994)

Cada espécimen se compactó con el máximo número de giros, registrando la altura durante el proceso. Como se conoce el peso de la muestra, el diámetro interno del molde fijo de 100 mm, y la medida de la altura para cualquier giro, se estimó la gravedad específica del espécimen ($G_{mb}(est)$ en la Tabla 14)

Al finalizar la compactación, se desmoldó el espécimen por extrusión y se dejó enfriar. Luego, se determinó la gravedad específica Bulk (G_{mb} medida en la Tabla 14) del espécimen utilizando la norma INV E-733-07. Se determinó también la G_{mm} de la mezcla (G_{mm} medida en la Tabla 14) con la norma INV E-735-07.

De la comparación de los valores de $G_{mb}(est)$ y de $G_{mb}(medida)$ de los especímenes para el $N_{máximo}$ surgió una diferencia que se debe a que durante la compactación, para el cálculo de $G_{mb}(est)$, se consideró al espécimen como un cilindro liso, lo cual, obviamente no es real. El volumen real del espécimen es ligeramente menor, debido a la presencia de vacíos superficiales alrededor del perímetro; así, la gravedad específica Bulk estimada del espécimen para un número de giros cualquiera debe corregirse con un factor, el cual es la relación entre la gravedad específica Bulk medida y la gravedad específica Bulk estimada para $N_{máximo}$. Este paso correctivo se indicó en la Tabla 14 en la columna $G_{mb}(corr)$; cada valor de la columna $G_{mb}(est)$ fue multiplicado por el factor de corrección para obtener el valor de la columna $G_{mb}(corr)$.

En las mezclas de agregado más grueso, o en las mezclas pobres en ligante asfáltico, las diferencias entre las gravedades específicas Bulk estimada y medida tienden a ser más grandes para $N_{máximo}$. En los agregados más finos, o en las mezclas más ricas en ligante asfáltico, se presentan diferencias pequeñas entre ambos valores. Esto se debe a que las mezclas finas con alto contenido de asfalto se aproximan más a la idea del cilindro de paredes lisas.

El último paso fue calcular el $\%G_{mm}$ para cada espécimen; para ello, se dividió la gravedad específica Bulk del espécimen (corregida) por el valor medido de G_{mm} . Se registró también el promedio de los $\%G_{mm}$ para los especímenes duplicados.

Los puntos más importantes del SGC ($\%G_{mm}$ para $N_{inicial}$, $N_{diseño}$ y $N_{máximo}$) se resaltan en la Tabla 14.

Tabla 14. Datos de la densificación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.6% de asfalto

Número de giros	Espécimen 1				Espécimen 2				% Gmm promedio
	H mm	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm %	H mm	Gmb (est)	Gmb (corr)	Gmm %	
5	126.2	2.092	2.116	87.7	122.9	2.102	2.127	88.2	88.0
9	124.4	2.121	2.146	89.0	121.2	2.132	2.158	89.5	89.2
15	122.7	2.150	2.175	90.2	119.6	2.161	2.187	90.7	90.4
20	121.8	2.166	2.191	90.8	118.6	2.179	2.206	91.4	91.1
30	120.4	2.192	2.217	91.9	117.3	2.203	2.229	92.4	92.2
40	119.5	2.209	2.235	92.6	116.3	2.221	2.247	93.2	92.9
50	118.7	2.223	2.248	93.2	115.7	2.233	2.260	93.7	93.5
60	118.0	2.236	2.262	93.8	115.0	2.246	2.273	94.2	94.0
80	117.2	2.251	2.277	94.4	114.1	2.264	2.291	95.0	94.7
100	116.4	2.267	2.293	95.1	113.7	2.272	2.299	95.3	95.2
126	115.9	2.277	2.303	95.5	112.9	2.289	2.317	96.0	95.8
150	115.4	2.287	2.313	95.9	112.3	2.300	2.328	96.5	96.2
175	114.9	2.297	2.323	96.3	112.0	2.307	2.335	96.8	96.6
204	114.6	2.303	2.329	96.6	111.7	2.312	2.340	97.0	96.8
Gmb (medida)		2.329				2.340			

Nota: Gmm (medida) = 2.412

El promedio de $\%G_{mm}$ calculado para $N_{inicial}$ (9 giros), $N_{diseño}$ (126 giros) y $N_{máximo}$ (204 giros) correspondió al 89.2%, 95.8% y 96.8% respectivamente. La Figura 34 ilustra la curva de compactación a partir de los datos de la tabla anterior.

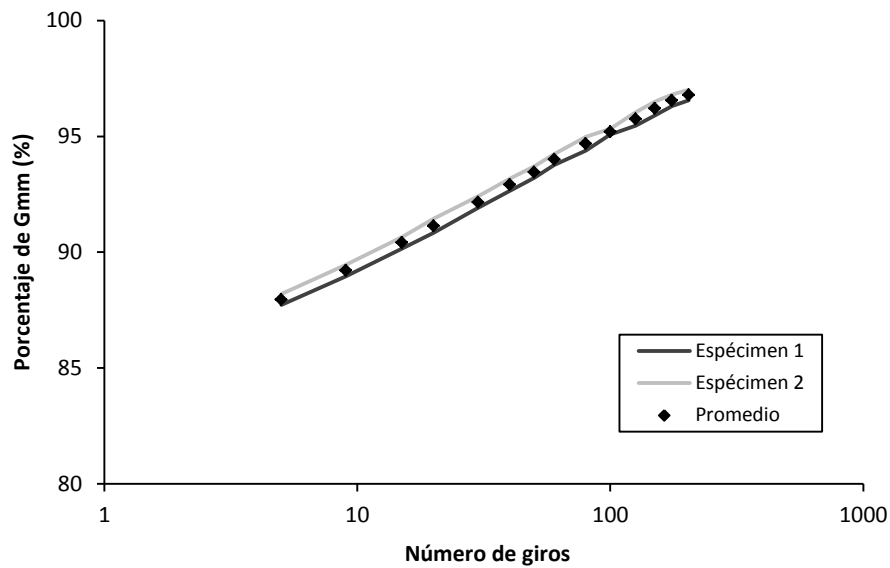


Figura 34. Curva de densificación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.6% de asfalto

Los porcentajes de vacíos de aire (V_a), vacíos del agregado mineral ($\%VMA$) y vacíos llenos de asfalto ($\%VFA$) se determinaron para $N_{diseño}$. El porcentaje de vacíos de aire (V_a) se calculó así:

$$\%Vacíos\ de\ aire = 100 - \%G_{mm}@N_{diseño}$$

$$\%Vacíos\ de\ aire = 100 - 95.8 = 4.2\%$$

El porcentaje de vacíos del agregado mineral ($\%VMA$) se calculó así:

$$\%VMA = 100 - (\%G_{mm}@N_{diseño} \times G_{mm} \times P_s) / G_{sb}$$

$$\%VMA = 100 - (95.8 \times 2.412 \times 0.944) / 2.538 = 14.1\%$$

El porcentaje de vacíos llenos de asfalto ($\%VFA$) se calculó así:

$$\%VFA = 100(VAM - Vacíos\ de\ aire) / VAM$$

$$\%VFA = 100(14.1 - 4.2) / 14.1 = 69.9\%$$

La Tabla 15 resume los valores de compactación y las propiedades volumétricas obtenidas para la mezcla de diseño.

Tabla 15. Resumen de las propiedades volumétricas y de compactación para la mezcla MDC-2 con 5.6% de asfalto

% de asfalto	%Gmm @ N=9	%Gmm @ N=126	%Gmm @ N=204	% vacíos de aire	% VMA	%VFA
5.6%	89.2	95.8	96.8	4.2%	14.1%	69.9%

La premisa principal del Nivel 1 de diseño de mezclas de SUPERPAVE es emplear en la mezcla de diseño la cantidad de ligante asfáltico que permita alcanzar, para $N_{diseño}$, exactamente el 96% de G_{mm} (4% de vacíos de aire). Evidentemente esto no sucedió para la mezcla inicial de diseño, por lo que se calculó el contenido de ligante asfáltico estimado ($P_{b,estimado}$) para alcanzar un 4% de vacíos de aire, empleando la siguiente fórmula empírica:

$$P_{b,estimado} = P_{bi} - [0.4 (4 - V_a)]$$

$$P_{b,estimado} = 5.6 - 0.4 (4 - 4.2) = 5.7\%$$

Las propiedades volumétricas (VMA y VFA) y de compactación de la mezcla se estimaron luego para este contenido de ligante asfáltico con el fin de conocer estas propiedades para el 4% de vacíos de aire y analizar la aceptabilidad o rechazo de la mezcla. Para esto se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Para el VMA:

$$\%VMA_{estimado} = \%VMA_{inicial} + C(4 - V_a)$$

$$\%VMA_{estimado} = 14.1 + 0.2 (4 - 4.2) = 14.1\%$$

$$C = constante (0.1 si V_a < 4\%; 0.2 si V_a > 4\%)$$

Para el VFA :

$$\%VFA_{estimado} = 100[(\%VMA_{estimado} - 4)/\%VMA_{estimado}]$$

$$\%VFA_{estimado} = 100[(14.1 - 4)/14.1] = 71.5\%$$

Para $\%G_{mm}$ para $@N_{inicial}$:

$$\%G_{mm,estimada}@N_{inicial} = \%G_{mm}@N_{inicial} - (4 - V_a)$$

$$\%G_{mm,estimada}@N_{inicial} = 89.2 - 4 - 4.2 = 89.4\%$$

Para $\%G_{mm}$ para $@N_{máximo}$:

$$\%G_{mm,estimada}@N_{máximo} = \%G_{mm}@N_{máximo} - (4 - V_a)$$

$$\%G_{mm,estimada}@N_{máximo} = 96.8 - 4 - 4.2 = 97.0\%$$

La Tabla 16 resume los valores estimados de las propiedades de compactación y volumétricas para la mezcla de diseño con 4% de vacíos de aire para $N_{diseño}$.

Tabla 16. Resumen de las propiedades volumétricas y de compactación para la mezcla asfáltica MDC-2 con 5.7% de asfalto

% de asfalto	%Gmm @ N=9	%Gmm @ N=126	%Gmm @ N=204	% vacíos de aire	% VMA	%VFA
5.7%	89.4	96.0	97.0	4.0%	14.1%	71.5%

Las propiedades estimadas se compararon con los criterios para mezclas. Para el tránsito de diseño y el tamaño máximo nominal, los criterios de densificación y volumétrico son los mostrados en la Tabla 17.

Tabla 17. Criterios de densificación y volumétrico para la mezcla asfáltica

Propiedad de la mezcla	Criterio
% de vacíos de aire	4.0%
% VMA	14.0% mín (TMN de 12.5 mm)
% VFA	65% - 75% (30-100x10 ⁶ ESALs)
% Gmm @ N _{inicial}	< 89%
% Gmm @ N _{máximo}	< 98%

Fuente: Strategic Highway Research Program (1994)

Asimismo, se controló el intervalo requerido para la proporción de llenante mineral, el cual es el mismo para todos los niveles de tránsito. Se determinó como el porcentaje en peso del material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) dividido por el contenido de ligante asfáltico efectivo (expresado como porcentaje en peso de la mezcla). El contenido de ligante asfáltico efectivo ($P_{be,estimado}$) se calculó así:

$$P_{be,estimado} = -(P_s \times G_b)[(G_{se} - G_{sb})/(G_{se} \times G_{sb})] + P_{b,estimado}$$

$$P_{be,estimado} = -(94.3 \times 1.007)[(2.625 - 2.538)/(2.625 \times 2.538)] + 5.7 = 5\%$$

La proporción de llenante mineral se calculó como sigue:

$$DP = P_{0.075}/P_{be,estimado}$$

$$DP = 6.0/5.0 = 1.2$$

La proporción de llenante mineral debe estar entre 0.6 y 1.2, por lo que el criterio se cumplió. Finalmente se analizaron todas las propiedades estimadas de la mezcla

La mezcla de diseño tuvo un VAM aceptable, asimismo cumplió el criterio del VFA, proporción de llenante mineral, y el criterio de densificación para $N_{máximo}$. Si bien el porcentaje de densificación para $N_{inicial}$ fue mayor al requerido, ello no perjudicó la aceptabilidad de la mezcla y se explica en la pre-compactación con varilla que sufrió el espécimen antes de ser compactado con el SGC.

4.5.3 Selección del contenido de ligante asfáltico de diseño

Con la verificación de las propiedades volumétricas y de la proporción de llenante mineral para la estructura de agregado de diseño, se compactaron especímenes con diferentes contenidos de ligantes asfálticos. Las propiedades de la mezcla se evaluaron luego para determinar el contenido de ligante asfáltico de diseño.

Se compactaron dos especímenes para cada uno de los siguientes contenidos de asfalto:

- Contenido estimado de ligante asfáltico,
- Contenido estimado de ligante asfáltico - 0.5%,
- Contenido estimado de ligante asfáltico + 0.5%,
- Contenido estimado de ligante asfáltico + 1.0%.

Para la mezcla de diseño, los contenidos de ligante fueron 5.2%, 5.7%, 6.2% y 6.7%. El nivel 1 de SUPERPAVE exige un mínimo de cuatro contenidos de ligante.

Asimismo, se preparó un espécimen para determinar la gravedad específica máxima teórica para cada contenido de ligante. Las propiedades de la mezcla son evaluadas para cada contenido de ligante asfáltico, utilizando los valores de densificación para $N_{inicial}$ (9 giros), $N_{diseño}$ (126 giros) y $N_{máximo}$ (204 giros).

El procedimiento utilizado fue igual al detallado en el punto anterior, la finalidad fue obtener los resultados del ensayo que permitieron ilustrar las curvas de densificación correspondientes a cada contenido de ligante asfáltico analizado.

La Figura 35 muestra el promedio de las curvas de densificación para cada contenido de ligante asfáltico evaluado.

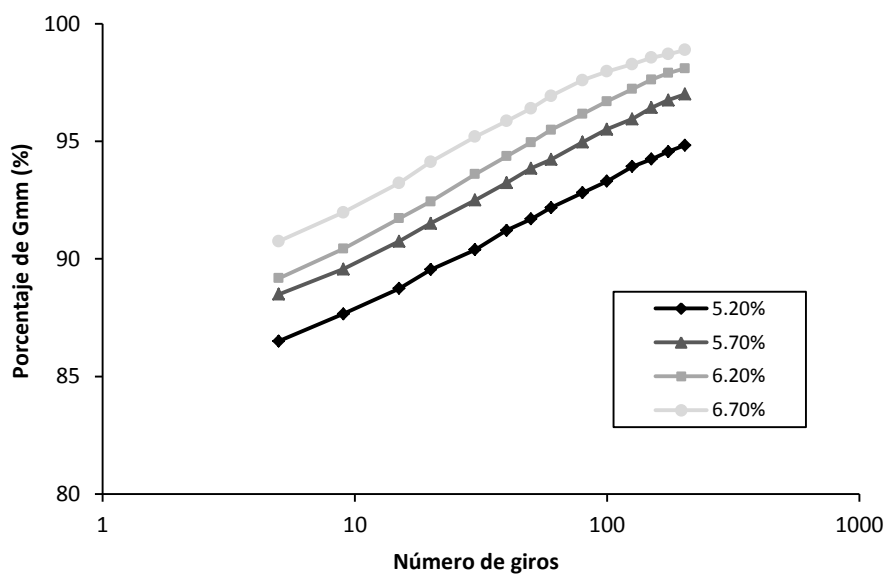


Figura 35. Curvas de densificación promedio para la mezcla asfáltica MDC-2

Utilizando el procedimiento ya descrito, se calcularon los valores de compactación y de las propiedades volumétricas los cuales se muestran en la Tabla 18 y la Tabla 19 en función de los diferentes contenidos de ligante asfáltico utilizado.

Tabla 18. Resumen de los valores de compactación de la mezcla asfáltica MDC-2

% de asfalto	%Gmm @ N=9	%Gmm @ N=126	%Gmm @ N=204
5.2	87.7	93.9	94.8
5.7	89.6	95.9	97.0
6.2	90.4	97.2	98.1
6.7	92.0	98.3	98.9

Tabla 19. Resumen de las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica MDC-2

% de asfalto	% de vacíos de aire	% VMA	%VFA
5.2	6.1	14.1	57.0
5.7	4.1	14.2	71.6
6.2	2.8	13.9	80.0
6.7	1.7	13.9	87.6

Las propiedades volumétricas se calcularon para el número de giros de diseño ($N_{diseño}$) y para cada contenido de ligante asfáltico evaluado. A partir de estos datos se generaron gráficos de contenido de vacíos de aire, VMA y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico, como se puede apreciar en la Figura 36 a la Figura 38.

El contenido de ligante asfáltico de diseño se fijó para lograr un 4% de vacíos de aire. En este diseño, el contenido de ligante asfáltico de 5.7% correspondió al 4% de vacíos de aire para el $N_{diseño}=126$ giros. Se verificó para este contenido de diseño el cumplimiento de las propiedades volumétricas de la mezcla. Los valores de diseño para la mezcla asfáltica seleccionada se presentan en la Tabla 20.

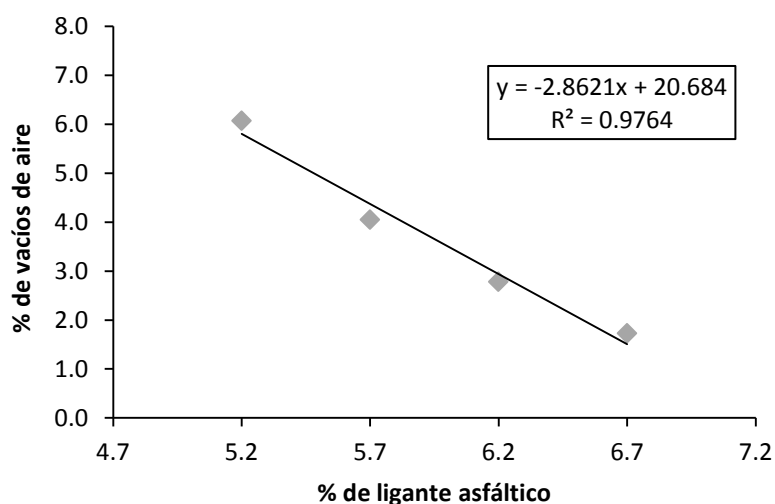


Figura 36. Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2

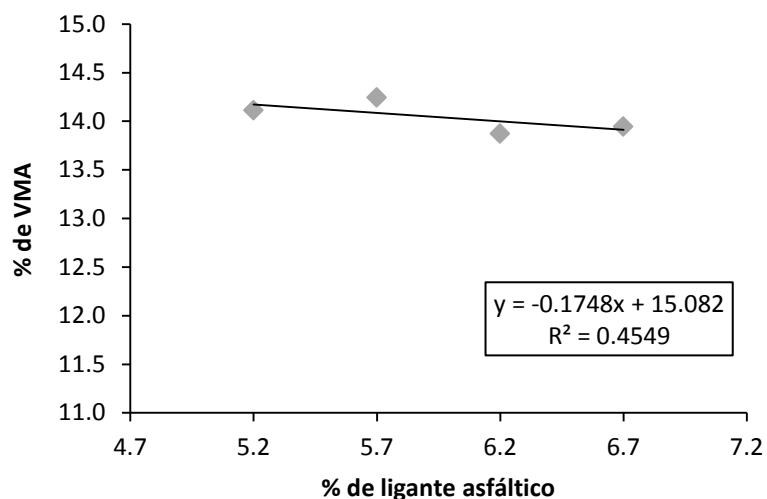


Figura 37. VMA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2

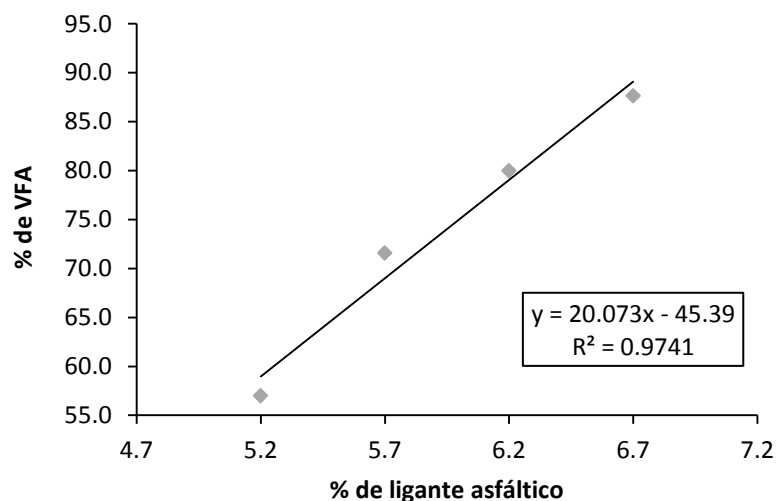


Figura 38. VFA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla MDC-2

Tabla 20. Propiedades de la mezcla asfáltica con 5.7% de asfalto

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio
% de vacíos de aire	4.0%	4.0%
% VMA	14.2%	14.0% mín
% VFA	71.6%	65% - 75%
Proporción de llenante mineral	1.2	0.6 - 1.2
% Gmm @ Nicial	89.6%	< 89%
% Gmm @ N máximo	97.0%	< 98%

Para el caso de la mezcla modificada con grano de caucho reciclado (GCR), el diseño se realizó siguiendo el mismo procedimiento ya descrito. Los criterios de selección de materiales y la estructura de agregado de diseño fueron iguales para ambos tipos de mezcla asfáltica.

Para la selección del contenido de ligante de diseño se utilizaron los porcentajes de 5.7%, 6.2%, 6.7% y 7.2%. Finalmente se verificaron las propiedades volumétricas y de densificación para cada contenido de ligante asfáltico de diseño.

La Figura 39 muestra el promedio de las curvas de densificación para cada contenido de ligante asfáltico modificado evaluado.

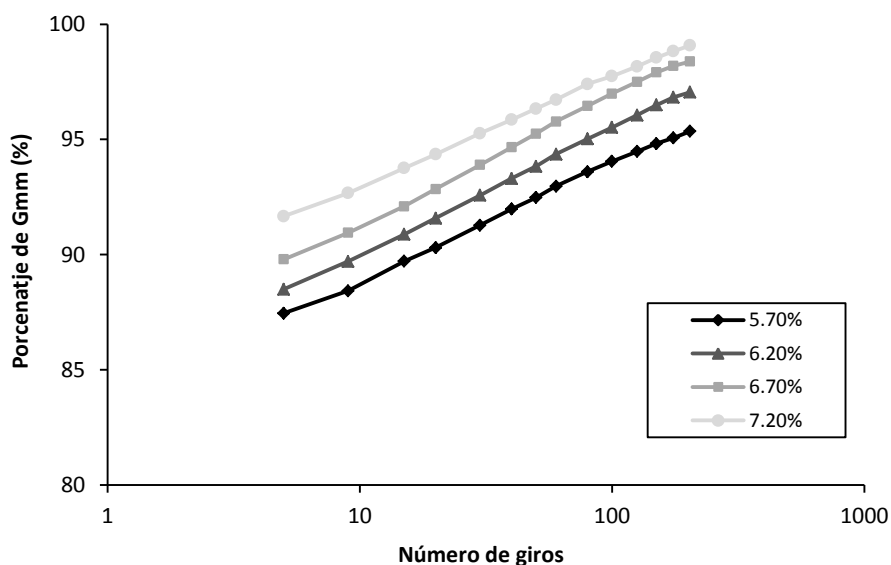


Figura 39. Curvas de densificación promedio para la mezcla modificada con GCR

Las propiedades de la mezcla modificada fueron evaluadas para cada contenido de ligante asfáltico, utilizando los valores de densificación para $N_{inicial}$ (9 giros), $N_{diseño}$ (126 giros) y $N_{máximo}$ (204 giros).

En la Tabla 21 y la Tabla 22 se presentan los valores de compactación y las propiedades volumétricas en función de los diferentes contenidos de ligante asfáltico modificado.

Tabla 21. Resumen de los valores de compactación de la mezcla modificada de diseño

% de asfalto	%Gmm @ N=9	%Gmm @ N=126	%Gmm @ N=204
5.7	88.4	94.5	95.4
6.2	89.7	96.1	97.1
6.7	90.9	97.5	98.4
7.2	92.7	98.2	99.1

Tabla 22. Resumen de los propiedades volumétricas de la mezcla modificada con GCR

% de asfalto	% de vacíos de aire	% VMA	%VFA
5.7	5.5	16.6	66.7
6.2	3.9	15.7	74.8
6.7	2.5	15.5	83.9
7.2	1.8	15.7	88.3

El contenido de ligante asfáltico de diseño se fijó para lograr un 4% de vacíos de aire. En este diseño, el contenido de ligante asfáltico modificado de 6.2% correspondió al 4% de vacíos de aire para el $N_{diseño}=126$ giros.

Las propiedades volumétricas se calcularon para el número de giros de diseño ($N_{diseño}$) y para cada contenido de ligante asfáltico evaluado. A partir de estos datos se generaron gráficos de contenido de vacíos de aire, VAM y VFA, en función del contenido de ligante asfáltico modificado, como se puede apreciar en la Figura 40 a la Figura 42.

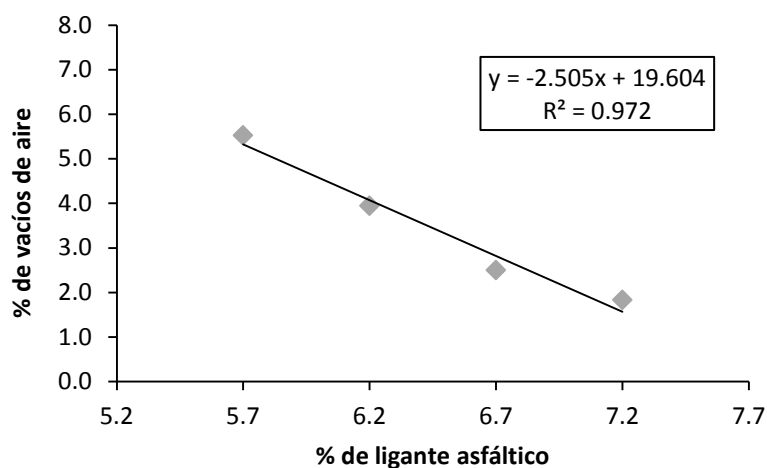


Figura 40. Vacíos de aire versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR

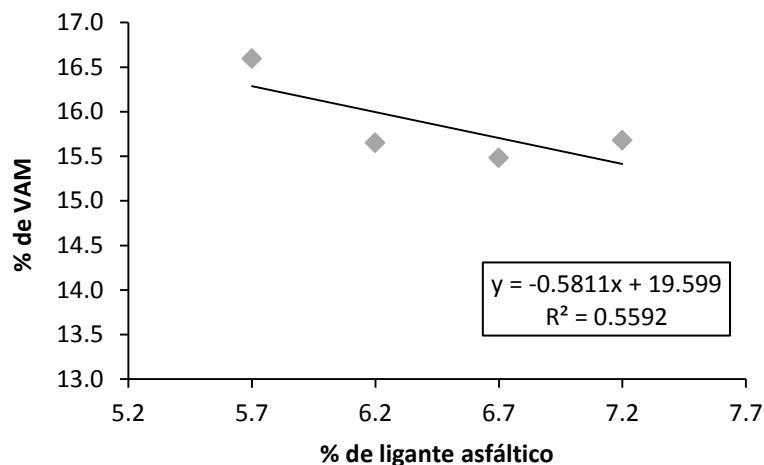


Figura 41. VMA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR

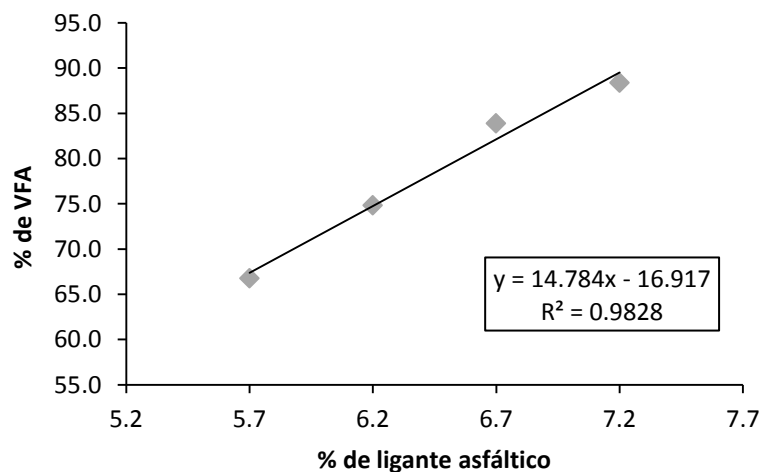


Figura 42. VFA versus contenido de ligante asfáltico, mezcla modificada con GCR

Se verificó para este contenido de diseño el cumplimiento de las propiedades volumétricas de la mezcla modificada. Los valores de diseño para la mezcla asfáltica seleccionada se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Propiedades de la mezcla asfáltica modificada con GCR con 6.2% de asfalto

Propiedad de la mezcla	Resultado	Criterio
% de vacíos de aire	4.0%	4.0%
% VMA	15.7%	14.0% mín
% VFA	74.8%	65% - 75%
Proporción de llenante mineral	1.2	0.6 - 1.2
% Gmm @ N _{inicial}	89.7%	< 89%
% Gmm @ N _{máximo}	97.1%	< 98%

4.5.4 Evaluación de la susceptibilidad a la humedad

El paso final en el Nivel 1 del diseño de mezclas es la evaluación de la sensibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. Este paso se realizó siguiendo la norma de ensayo INV E-725-07 a la mezcla de agregados de diseño con el contenido de ligante de diseño; para esto, se compactaron seis especímenes con un contenido de vacíos de aire de $7 \pm 1\%$, de ellos, tres fueron considerados como especímenes de control, y los otros tres fueron sometidos a una saturación por vacío previo ciclo de inmersión en agua durante 24 horas a 60 °C. Todos los especímenes fueron ensayados para determinar su resistencia a la tracción indirecta.

La susceptibilidad a la humedad es el cociente entre la resistencia a la tracción del grupo sumergido entre la resistencia a la tracción del grupo de control. El valor promedio mínimo para la relación de resistencias fue del 80%. La Figura 43 muestra los valores del ensayo de sensibilidad a la humedad para la mezcla asfáltica MDC-2, en el cual se tiene una relación promedio de resistencia a la tracción de 83.84%, cumplimiento con el valor mínimo especificado.

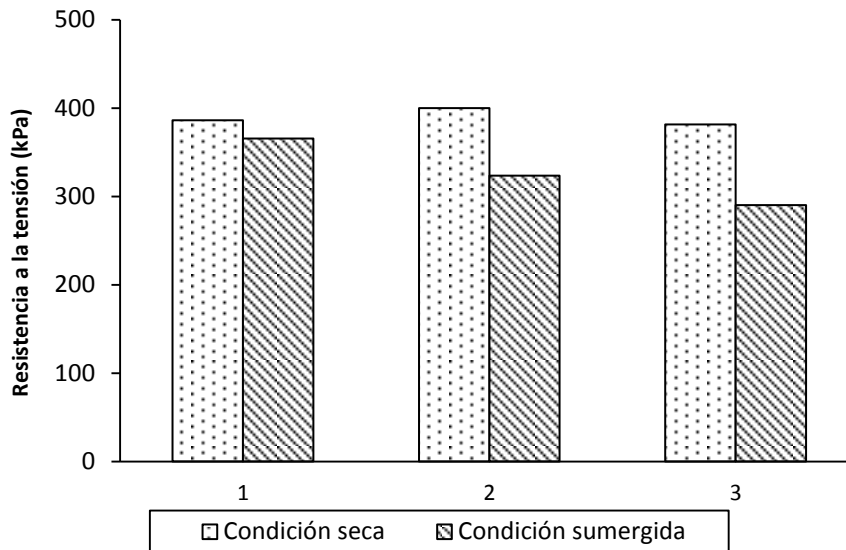


Figura 43. Susceptibilidad a la humedad para la mezcla MDC-2

Para la evaluación de la sensibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica modificada con grano de caucho reciclado (GCR) se siguió el mismo procedimiento descrito en la norma de ensayo INV E-725-07. La Figura 44 muestra el resultado del ensayo para la mezcla asfáltica modificada cuya relación promedio de resistencia a la tracción es 96.36, cumpliendo con el valor mínimo requerido.

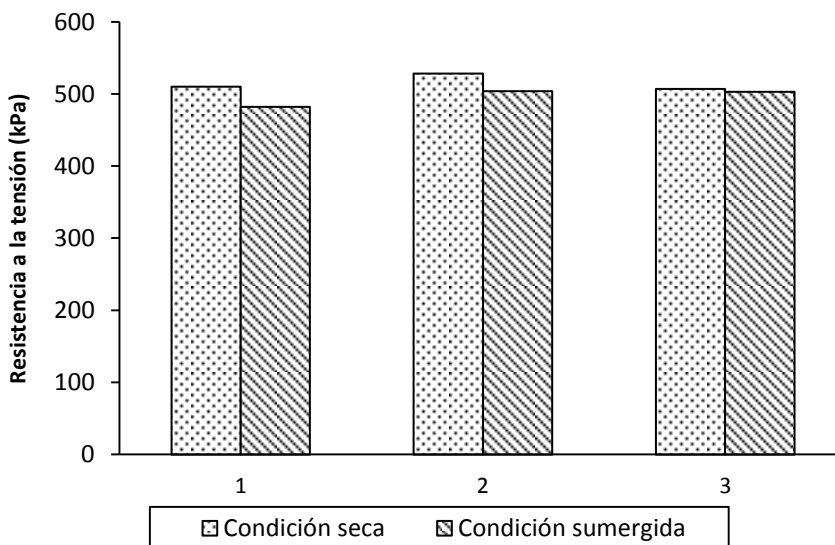


Figura 44. Susceptibilidad a la humedad para la mezcla modificada con GCR

4.6 ENSAYOS DINÁMICOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

4.6.1 Módulos dinámicos de mezclas asfálticas

El módulo dinámico se define como el valor absoluto del módulo complejo que define las propiedades elásticas de un material de viscosidad lineal sometido a una carga sinusoidal; a su vez que el módulo complejo está definido como un número complejo que define la relación entre el esfuerzo y la deformación para un material viscoelástico lineal.

El método de ensayo utilizado para determinar el módulo dinámico es el de compresión axial, que consiste en aplicar un esfuerzo de compresión sinusoidal (medio seno inverso), a especímenes de mezclas asfálticas, con un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencias de carga. Se mide la respuesta resultante recuperable de la deformación axial del espécimen y se emplea para calcular el módulo dinámico.

Para el desarrollo de los módulos por compresión axial, se utilizó el actuador dinámico de marca MTS mostrado en la Figura 45, equipo hidráulico que cuenta con un generador que produce una onda de medio seno inverso para calcular el módulo dinámico. Asimismo, la prensa tiene la capacidad de aplicar cargas dentro de un intervalo de frecuencias que van desde 0.1 Hz hasta 25 Hz y de temperaturas entre 5°C y 60°C por medio de una cámara de control de temperatura, a la vez que se registra las deformaciones verticales producidas.

La metodología del ensayo se basó en la norma colombiana INV E-754-07 y contempló el uso de tres temperaturas: 5°C, 25°C y 40°C y tres frecuencias: 1 Hz, 4 Hz y 16 Hz. Se fabricaron un total de 3 probetas cilíndricas con diámetro de 100 mm y altura de 200 mm para cada tipo de mezcla asfáltica analizada.



Figura 45. Actuador dinámico marca MTS

Se llevaron las probetas a las temperaturas de ensayo especificadas, se aplicó el esfuerzo de 35 psi durante 40 segundos y se midieron las deformaciones resultantes para cada una de las frecuencias establecidas. La Figura 46 y la Figura 47 muestran tanto el esfuerzo debido a la carga aplicada como la deformación axial durante el ensayo.

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando.

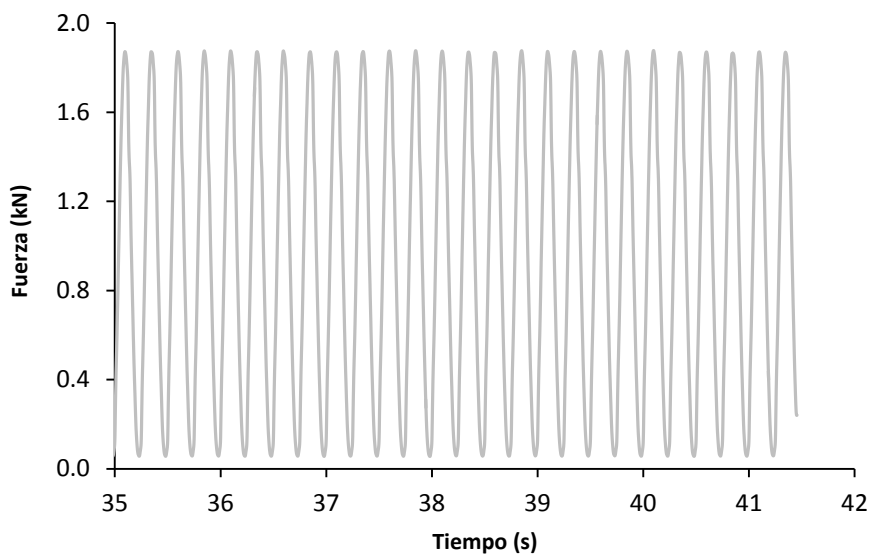


Figura 46. Registro de la fuerza aplicada contra el tiempo

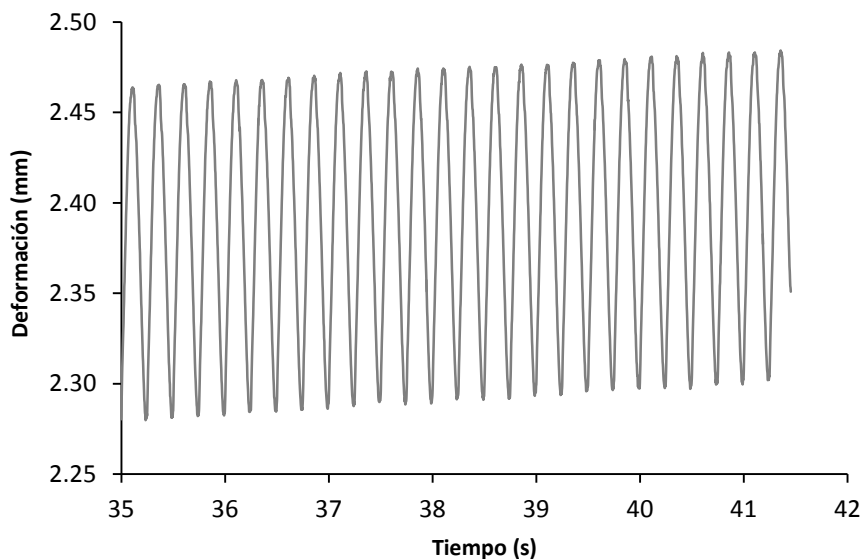


Figura 47. Registro de la deformación medida contra el tiempo

Se mide la amplitud promedio de la carga y de la deformación durante los cuatro últimos ciclos de carga para calcular el valor del módulo dinámico de la mezcla asfáltica. La Figura 48 y la Figura 49 muestran los módulos obtenidos, por cada

combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de carga utilizada, para la mezcla convencional y la mezcla modificada respectivamente.

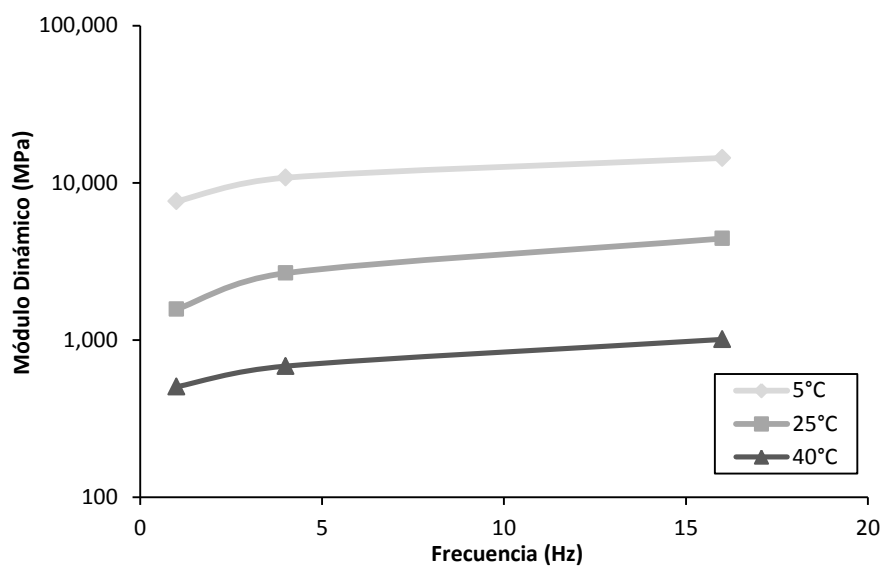


Figura 48. Módulos dinámicos para la mezcla asfáltica MDC-2

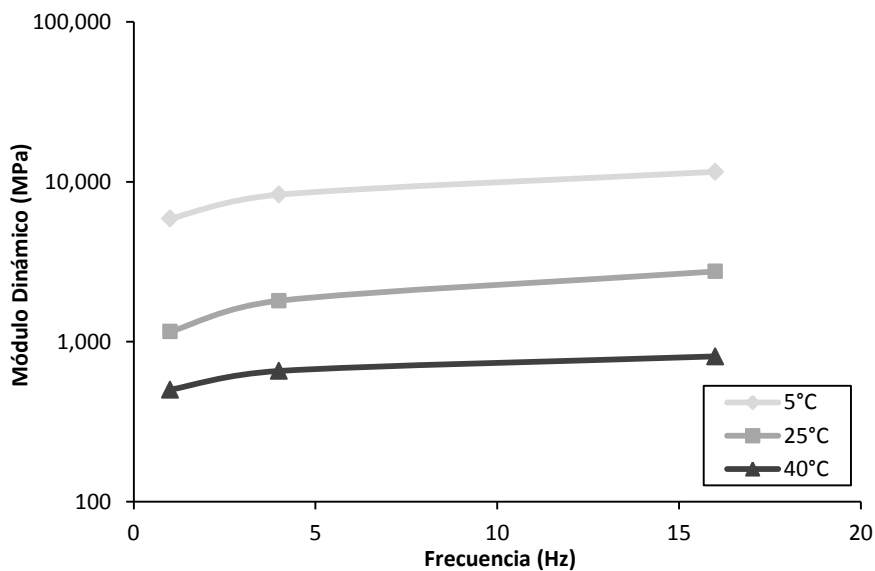


Figura 49. Módulos dinámicos para la mezcla asfáltica modificada con GCR

4.6.2 Módulo resiliente de mezclas asfálticas

El módulo resiliente define las propiedades elásticas de un material viscoelástico lineal sometido a una carga sinusoidal y es una medida de la rigidez de las mezclas asfálticas. Se puede considerar como la propiedad más importante debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de las mezclas y hace referencia a la relación entre la deformación del material bajo una carga aplicada y el esfuerzo.

El método de ensayo utilizado para determinar el módulo resiliente es el de tensión indirecta, el cual es un método no destructivo cuyo tiempo de ejecución es corto. Este método consiste en aplicar una carga de compresión a lo largo del diámetro vertical de un cilindro, el cual induce un esfuerzo indirecto de tensión a lo largo del diámetro horizontal y una deformación a lo largo del mismo diámetro.

Para el desarrollo de los módulos por tensión indirecta, se utilizó el Nottingham Asphalt Tester (NAT) mostrado en la Figura 50, equipo que fue desarrollado por Cooper Research Technology. Esta prensa hidráulica es un equipo servoneumático que aplica un pulso de carga de compresión a lo largo del diámetro vertical de la muestra a una temperatura y una frecuencia de carga establecidas, aplicando tensiones y registrando deformaciones horizontales.

La metodología del ensayo se basó en la norma colombiana INV E-749-07 y contempló el uso de tres temperaturas: 10°C, 20°C y 30°C y tres frecuencias: 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz. Se fabricaron un total de 3 probetas cilíndricas con diámetro de 100 mm y altura de 70 mm para cada una de las mezclas asfálticas analizadas.



Figura 50. Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT)

Las probetas se acondicionaron a la temperatura de ensayo antes de ser centradas en la cámara, luego se midió para cada muestra la máxima deformación horizontal en el en el centro de la probeta a partir de la relación de Poisson; de igual manera, se midió en el centro el máximo esfuerzo por tensión y el módulo de rigidez.

La Figura 51 y la Figura 52 muestran los valores de los módulos resilientes obtenidos por cada combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de carga utilizada, para la mezcla convencional y la mezcla modificada respectivamente.

Finalmente, a partir de los resultados anteriores se obtuvieron las curvas maestras que describen la variación del valor del módulo resiliente con respecto al parámetro "X" que representa la combinación de temperatura y frecuencia utilizada. Este parámetro se describe a continuación:

$$X = \alpha_T + \ln f$$
$$\alpha_T = 2.52 \times 10^4 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right)$$

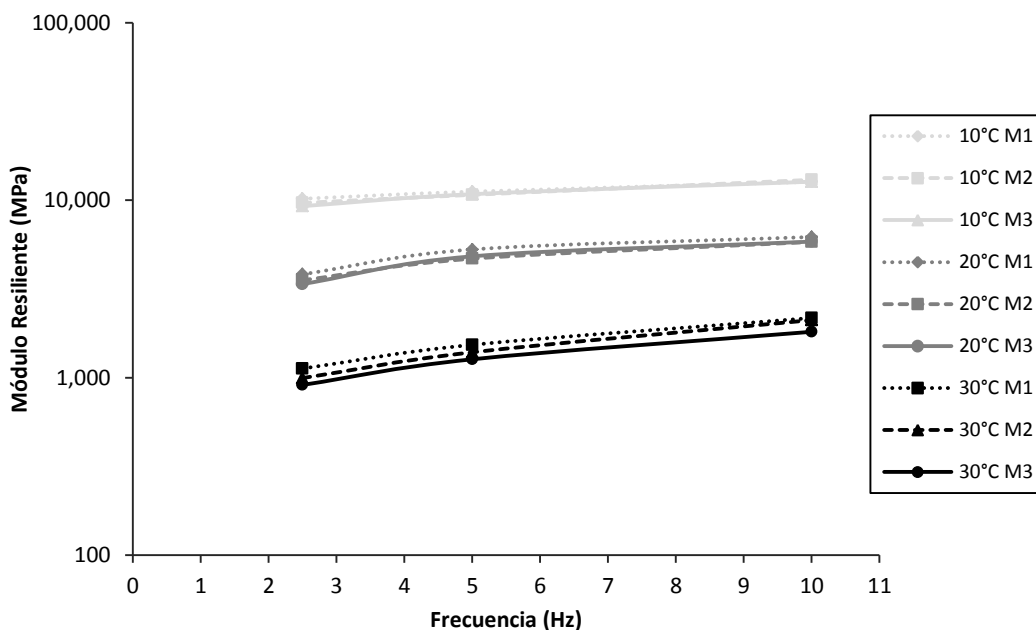


Figura 51. Módulos resilientes para la mezcla asfáltica MDC-2

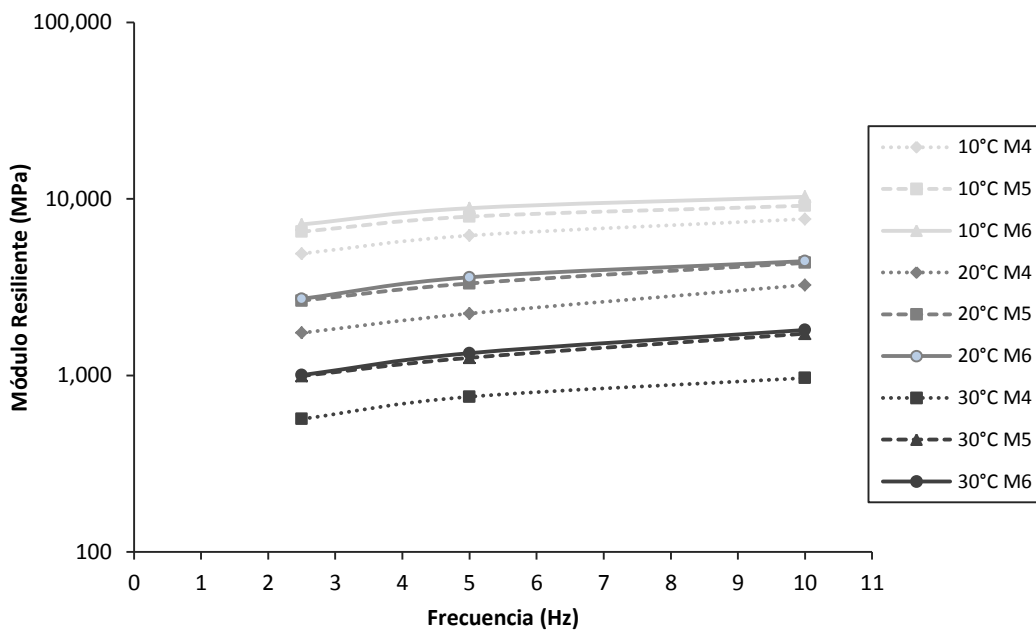


Figura 52. Módulos resilientes para la mezcla asfáltica modificada con GCR

Donde α_T es el factor de modificación en función de la temperatura, f es la frecuencia de ensayo en Hertz, T es la temperatura absoluta de ensayo en Kelvin y T_s es la temperatura absoluta de referencia expresada en Kelvin. En la Figura 53 y en la Figura 54 se aprecia el ajuste lineal de los módulos obtenidos que dan origen a la curva maestra, para las mezclas convencional y modificada respectivamente.

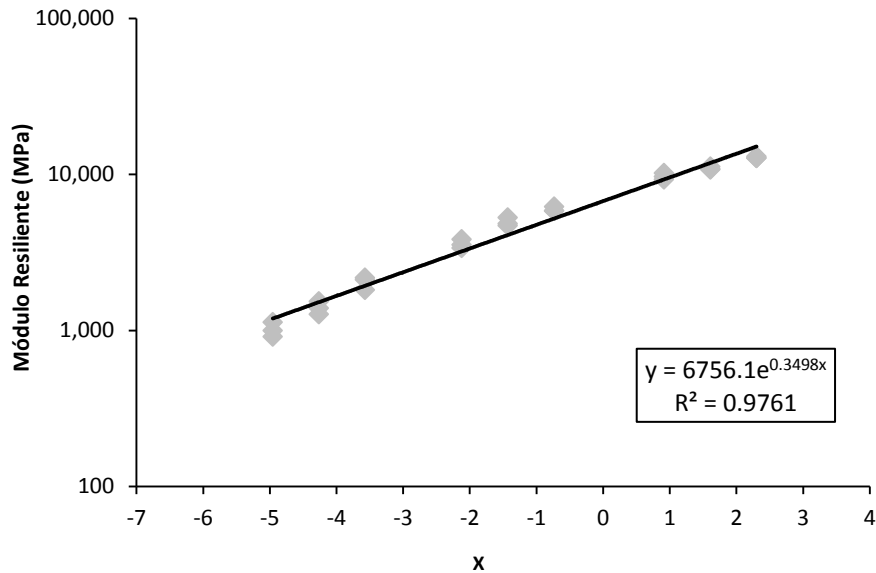


Figura 53. Curva maestra para la mezcla asfáltica MDC-2

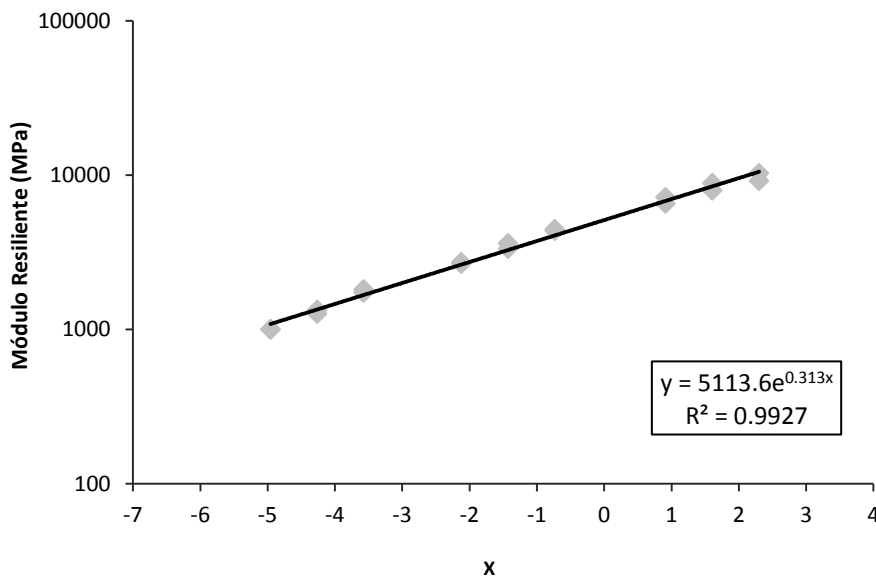


Figura 54. Curva maestra para la mezcla asfáltica modificada con GCR

4.6.3 Fatiga de mezclas asfálticas en equipo NAT

La fatiga de mezclas asfálticas es un proceso de cambio estructural permanente y progresivo que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables y tiene como resultado la aparición de fisuras que conducen luego a una fractura total del material debido a la aplicación de un número determinado de repeticiones o ciclos.

El estudio de la fatiga contempla la rotura producida bajo cargas en el período elástico del comportamiento del material, se produce una pérdida de resistencia en función del número de ciclos que excede la resistencia máxima, provocando un problema de plasticidad y daños secundarios.

Para ejecutar los ensayos de fatiga se utilizó el Nottingham Asphalt Tester (NAT) mostrado en la Figura 50 y en la Figura 55, desarrollado por Cooper Research Technology. Este equipo aplica un pulso de carga de compresión a lo largo del diámetro vertical de una muestra cilíndrica, a una temperatura y una frecuencia de carga establecida. Este modo de carga induce un esfuerzo de tensión perpendicular a la dirección de aplicación de carga (tensión indirecta) relativamente uniforme, que causa que la muestra falle por fisuramiento a lo largo de la parte central del diámetro vertical.

La metodología del ensayo se desarrolló siguiendo la norma europea EN-12697-24 y se utilizó una frecuencia de 2.5 Hz con una temperatura de 20°C. Se fabricaron un total de 10 probetas cilíndricas con diámetro de 100 mm y altura de 70 mm para cada tipo de mezcla asfáltica analizada.

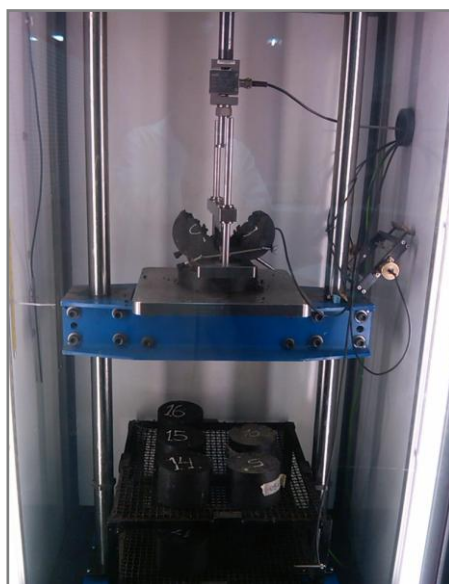


Figura 55. Fatiga en Equipo Nottingham Asphalt Tester (NAT)

El ensayo trata de simular la condición de una carpeta asfáltica ubicada en un lugar con temperatura media de 20°C y con una condición de tráfico media. El esfuerzo empleado fluctuó entre 150 kPa y 500 kPa y permitió la elaboración de las correspondientes leyes de fatiga.

La Figura 56 representa la variación de la deformación vertical permanente según el número de ciclos aplicados a la mezcla convencional, para el ensayo realizado a esfuerzo constante de 300 kPa, y ejemplifica el comportamiento de las mezclas asfálticas ensayadas en laboratorio.

El número de ciclos hasta la falla para cada nivel de esfuerzo máximo aplicado, fue calculado por interpolación lineal de los datos obtenidos con el ensayo de fatiga a tracción indirecta, siguiendo el criterio de falla por fatiga propuesto por la Universidad de Nottingham: 10 mm de deformación vertical en las probetas cilíndricas, motivo por el cual la gráfica muestra una tendencia hacia arriba hasta que se produce la fractura total del material.

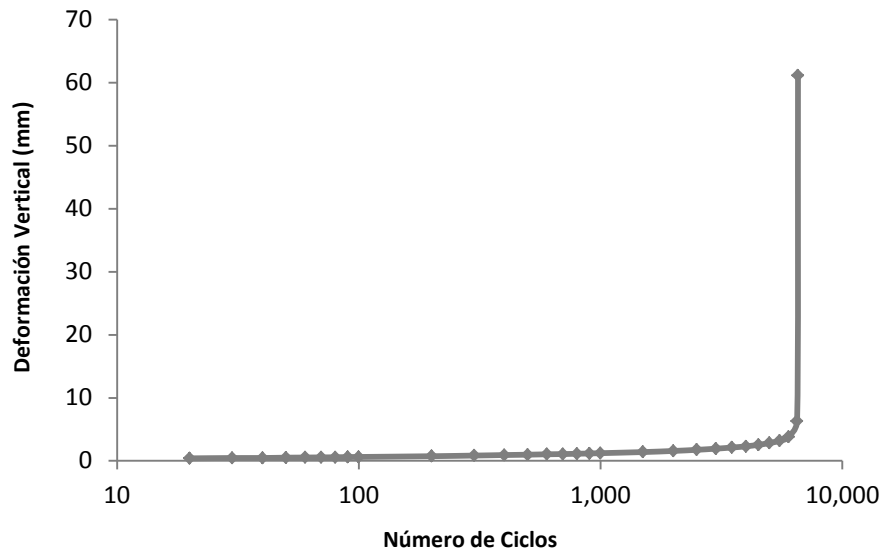


Figura 56. Variación de la deformación según las repeticiones aplicadas, equipo NAT

La Figura 57 y la Figura 58 muestran los niveles de esfuerzos aplicados así como la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas, representando la tendencia del material según su vida útil por fatiga, para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica modificada respectivamente.

De las gráficas obtenidas, es importante resaltar dos parámetros importantes que constituyen el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas. El primero de ellos es la pendiente de fatiga "b" la cual es una medida de la vida esperada de la mezcla por su resistencia a la fatiga, y el segundo es el valor de esfuerzo " σ_6 " definido para un millón de ciclos de carga.

Para la mezcla asfáltica convencional se obtuvieron valores para "b" y " σ_6 " iguales a -0.235 y 97 MPa correspondientemente; mientras que para la mezcla asfáltica modificada, los valores obtenidos para "b" y " σ_6 " fueron de -0.176 y 135 MPa respectivamente.

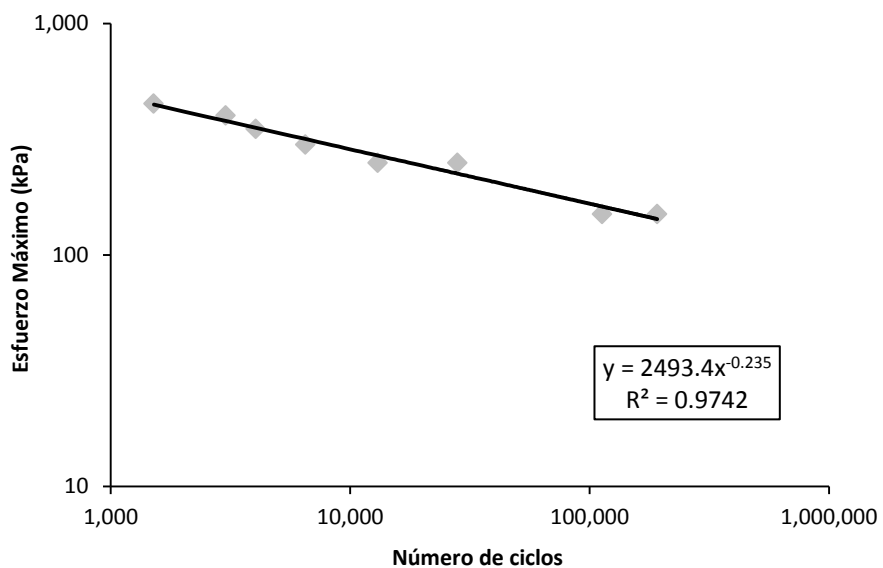


Figura 57. Ley de fatiga en NAT para la mezcla asfáltica MDC-2

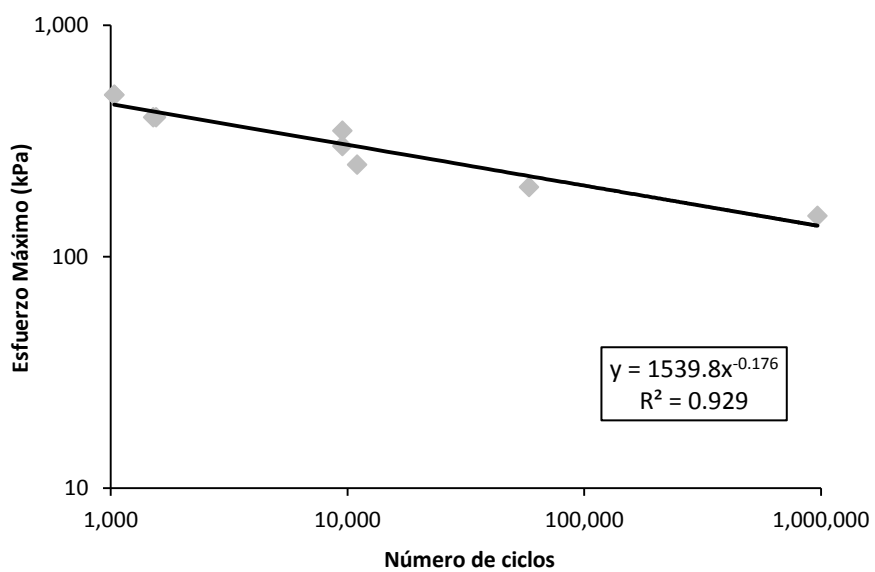


Figura 58. Ley de fatiga en NAT para la mezcla asfáltica modificada con GCR

4.6.4 Fatiga de mezclas asfálticas en Banco de Fatiga

La fatiga de mezclas asfálticas es un proceso de cambio estructural permanente y progresivo que ocurre en un punto del material sujeto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables y tiene como resultado la aparición de fisuras que conducen luego a una fractura total del material debido a la aplicación de un número determinado de repeticiones o ciclos.

El método de ensayo utilizado para determinar la aparición del fenómeno de fatiga de las mezclas asfálticas es el propuesto por el Laboratorio Central de Puentes y Calzadas (LCPC), el cual aplica flexión sinusoidal sobre probetas trapezoidales apoyadas en sus extremos.

Para el desarrollo del ensayo de fatiga en dos puntos se utilizó el Banco de Fatiga, mostrado en la Figura 59. Este equipo, que fue construido por la Pontificia Universidad Javeriana, utiliza un mecanismo de flexión por tracción, que consiste en someter una probeta trapezoidal, apoyada en sus extremos a un desplazamiento que varía en el tiempo según una función sinusoidal, para así relacionar las deformaciones máximas iniciales producidas en el tercio medio de la probeta con el número de ciclos necesarios para obtener las leyes de fatiga correspondientes.

La metodología del ensayo se basó en la norma francesa NFP 98-216-1 y se utilizó una frecuencia de 10 Hz a temperatura ambiente (en promedio 19°C). Se fabricaron un total de 12 probetas de forma trapezoidal con las siguientes dimensiones: Altura de 250 mm, base mayor de 75 mm, base menor de 25 mm y espesor de 25 mm, para cada tipo de mezcla asfáltica analizada.



Figura 59. Bancos de Fatiga de la Pontificia Universidad Javeriana

Para la obtención de las probetas se utilizaron moldes con altura de 35 mm, ancho de 300 y largo de 500 mm, luego estas muestras rectangulares fueron cortadas a las dimensiones de los trapecios ya especificadas. Las probetas se colocaron en el Banco Francés y el ensayo se desarrolló con tres niveles de deformaciones: 90 μm , 150 μm y 220 μm , con la finalidad de obtener las leyes de fatiga para cada tipo de mezcla evaluada.

La Figura 60 representa la variación de la fuerza según el número de ciclos aplicados a la mezcla convencional, para el ensayo realizado a deformación constante de 220 μm , y ejemplifica el comportamiento de las mezclas asfálticas ensayadas en laboratorio. La gráfica muestra una tendencia hacia abajo, ya que el criterio de falla por fatiga de probetas trapezoidales se define cuando la respuesta del material llega al 50% de la carga inicial, sin embargo, si esta se rompe antes de llegar al 50% del registro inicial también se considera fallada, siempre y cuando, la falla se encuentre a $\frac{3}{4}$ de la base, de lo contrario se descarta la briqueta.

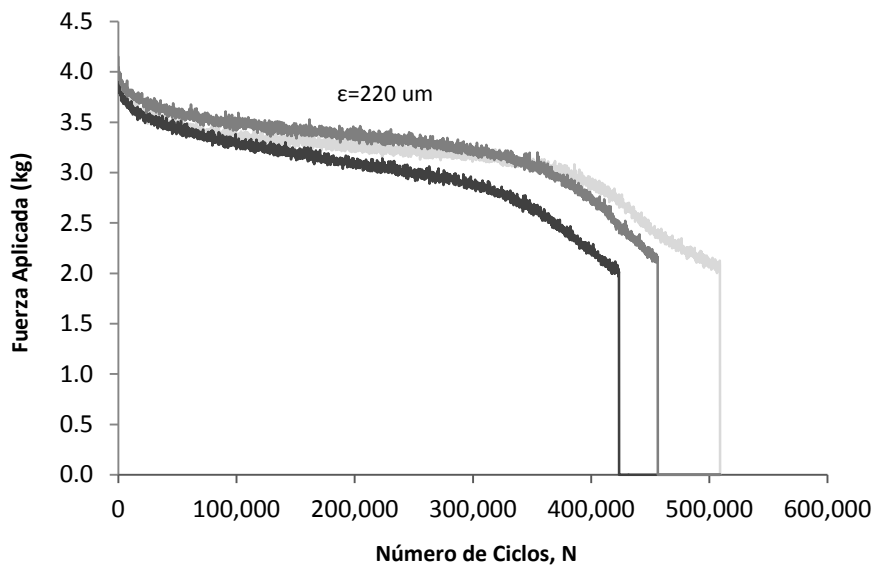


Figura 60. Variación de la fuerza según las repeticiones aplicadas, Banco de Fatiga

La Figura 61 y la Figura 62 presentan las leyes de fatiga en las que se aprecia la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas por cada nivel de deformación establecido, para la mezcla convencional y la mezcla modificada respectivamente.

De las gráficas obtenidas para las leyes de fatiga, es importante resaltar dos parámetros importantes para el diseño racional de pavimentos. El primero de ellos es la pendiente de fatiga "b" la cual indica una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga, y el segundo es el valor de deformación " ξ_6 " definido para un millón de repeticiones.

Para el caso de la mezcla asfáltica convencional se obtuvieron valores para "b" y " ξ_6 " iguales a -0.258 y 181.509 μm correspondientemente; mientras que para la mezcla asfáltica modificada, los valores obtenidos para "b" y " ξ_6 " fueron de -0.220 y 223.63 μm respectivamente.

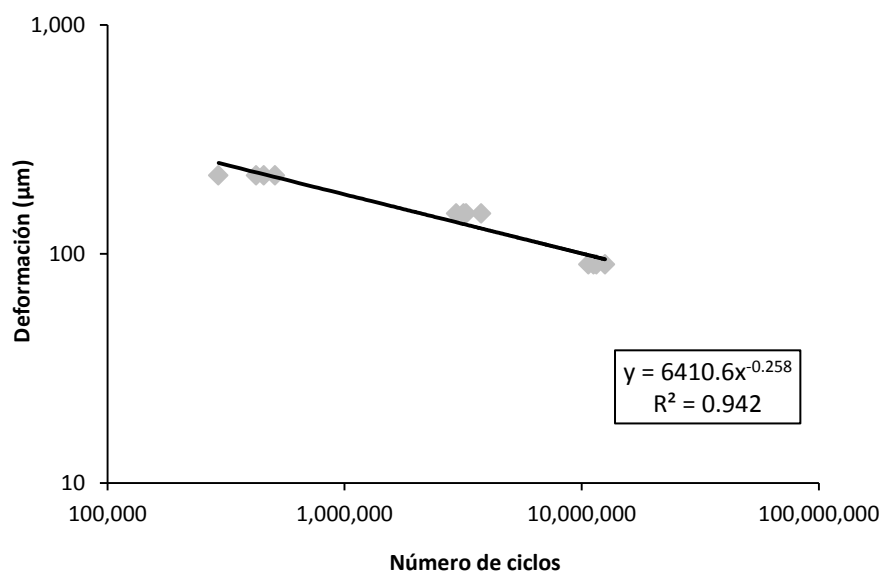


Figura 61. Ley de fatiga en Banco para la mezcla asfáltica MDC-2

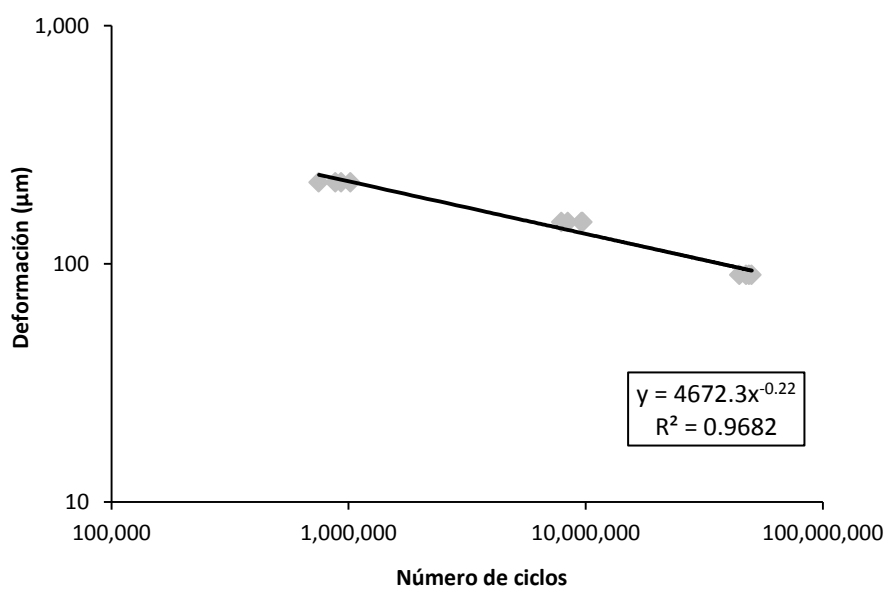


Figura 62. Ley de fatiga en Banco para la mezcla asfáltica modificada con GCR

4.6.5 Fatiga de mezclas asfálticas en Equipo de Reflexión

La fatiga por reflexión es definida como las fisuras presentes en una sobrecarpeta asfáltica o capa de rodadura que son el resultado del reflejo de las fisuras o patrón de juntas en la capa subyacente, producto de la acción del medio ambiente o del tráfico inducido.

El método de ensayo utilizado para determinar la fatiga por reflexión es el de tracción directa, que consiste en aplicar esfuerzos de tracción (en ondas triangulares) a especímenes de mezclas asfálticas. El ensayo considera un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencias de carga y se mide el número de ciclos necesarios para lograr la fatiga del material.

Para el desarrollo del ensayo de fatiga por reflexión, se utilizó el Equipo de Reflexión mostrado en la Figura 63. Este equipo, que pertenece a la Pontificia Universidad Javeriana, fue construido durante el desarrollo del presente trabajo y utiliza un mecanismo de tracción directa, que consiste en someter una probeta cilíndrica acondicionada, apoyada y pegada en su base inferior, a unos desplazamientos de apertura y oclusión que varían en el tiempo según una función triangular, para así relacionar las deformaciones máximas iniciales producidas en la probeta con el número de ciclos necesarios para obtener las leyes de fatiga correspondientes.

La metodología se basó en el procedimiento de ensayo americano TEX-248-F y se contempló el uso de tres temperaturas: 10°C, 25°C y 40°C para un período de 10 s y una amplitud variable de hasta 2 mm. Se fabricaron un total de 30 probetas acondicionadas para los tipos de mezcla asfáltica analizados.



Figura 63. Equipo de Reflexión de la Pontificia Universidad Javeriana

Se utilizó el molde del compactador giratorio Superpave para la obtención de probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 115 mm de altura. Seguidamente, se cortaron perpendicularmente los bordes sobre la superficie superior de los especímenes y luego se cortaron las partes superior e inferior del espécimen para obtener una muestra con una altura de 38 mm. Finalmente, se colocaron las probetas en el Equipo de Reflexión y el ensayo se desarrolló con tres niveles de deformación: 0.43 mm, 0.86 mm y 1.30 mm, con la finalidad de obtener las leyes de fatiga para cada tipo de mezcla evaluada.

La Figura 64 representa la variación de la fuerza según el número de ciclos aplicados a la mezcla convencional, para el ensayo realizado a deformación constante de 0.86 mm, y ejemplifica el comportamiento de las mezclas asfálticas ensayadas en laboratorio. La gráfica muestra una tendencia hacia abajo, ya que el criterio de falla por fatiga se define cuando una reducción del 93% o más de la carga inicial medida en el primer ciclo es registrada, sin embargo, si esta se rompe antes de llegar al 93% del registro inicial también se considera la muestra fallada.

Complementariamente, si no se alcanza el 93% de la reducción de carga durante los primeros 800 ciclos, el ensayo se ejecuta a 1200 ciclos y se registra el porcentaje de disminución de carga.

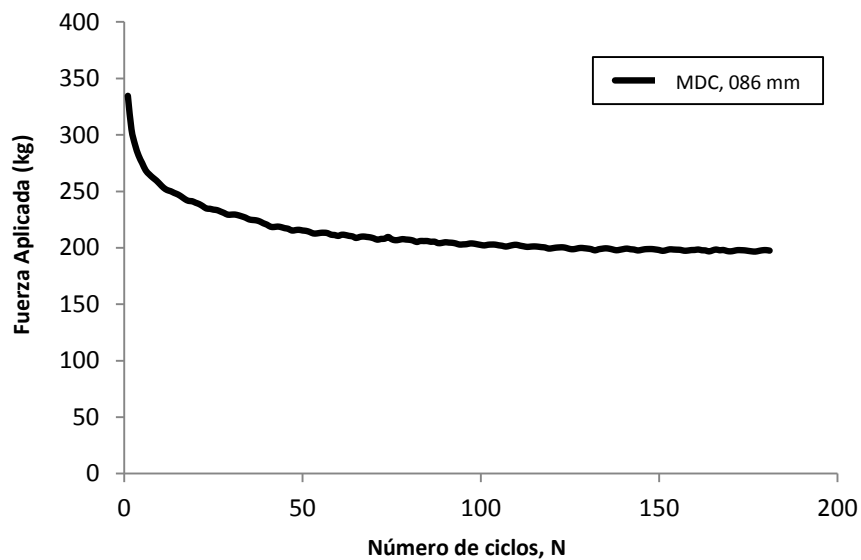


Figura 64. Variación de la fuerza según las repeticiones aplicadas, Equipo de Reflexión

Como ya se indicó, se realizaron ensayos variando los parámetros de deformación y temperatura, asimismo se realizaron ensayos para evaluar la repetibilidad del equipo. Los resultados se presentan más adelante, sin embargo, como ejemplo se presentan en la Figura 65 y la Figura 66 las leyes de fatiga obtenidas para las mezclas convencional y modificada a 25°C y con una deformación de 0.86 mm.

De las gráficas obtenidas para las leyes de fatiga, es importante resaltar la pendiente de fatiga "b" la cual indica una medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica por su resistencia a la fatiga. Para el caso de la mezcla asfáltica convencional se obtuvo un valor para "b" igual a -0.236 mientras que para la mezcla asfáltica modificada, el valor para "b" fue de -0.188.

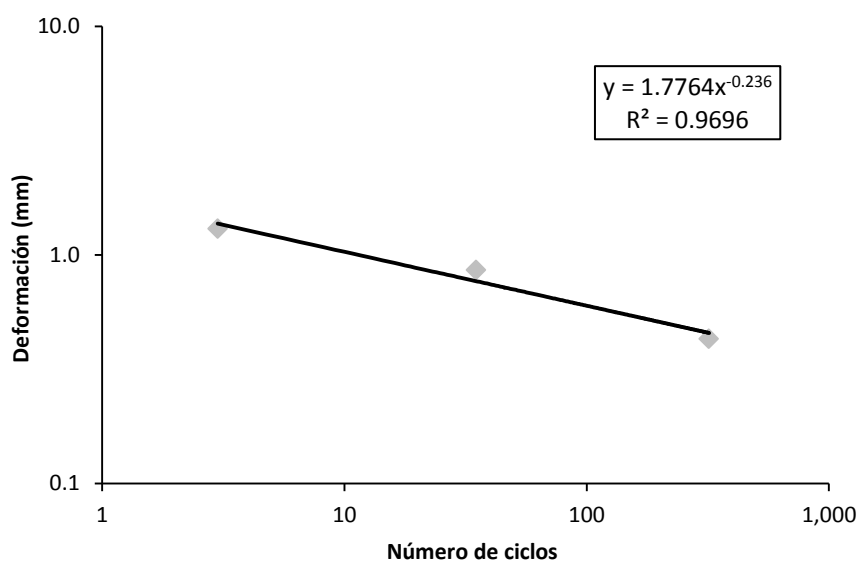


Figura 65. Ley de fatiga en Equipo de Reflexión para la mezcla asfáltica MDC-2

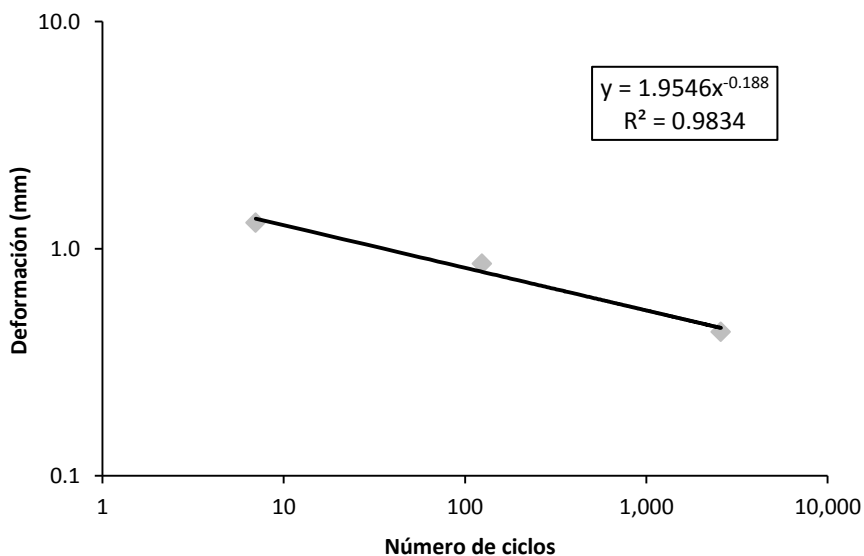


Figura 66. Ley de fatiga en Equipo de Reflexión para la mezcla modificada con GCR

En el ANEXO H y el ANEXO I se presentan todos los resultados de los ensayos de caracterización dinámica realizados a la mezcla asfáltica convencional MDC-2 y a la mezcla asfáltica modificada con caucho respectivamente.

4.6.5.1 Repetibilidad del ensayo con el Equipo de Reflexión

Para evaluar la repetibilidad del ensayo con el Equipo de Reflexión construido, se seleccionaron dos tipos de mezcla asfáltica de la normatividad colombiana (mezcla MDC-2 tipo INVIAS y mezcla modificada con GCR tipo IDU) para fabricar nueve especímenes idénticos (150 mm de diámetro por 38 mm de altura), utilizando el Compactador Giratorio Superpave. El contenido de aire de cada muestra se controló en el 4 por ciento después de recortar las muestras. Por último, se pegaron nueve muestras para cada tipo de mezcla a las placas del Equipo de Reflexión. El ensayo se realizó a la temperatura de 25 °C , el desplazamiento de apertura se estableció en los valores de 0.43 mm, 0.86 mm y 1.30 mm y se ensayaron tres probetas para cada nivel de desplazamiento.

La Figura 67 presenta la vida debido a la fatiga por reflexión de las nueve muestras con mezcla asfáltica convencional (MDC-2) y la Figura 68 de las muestras con mezcla asfáltica modificada (GCR).

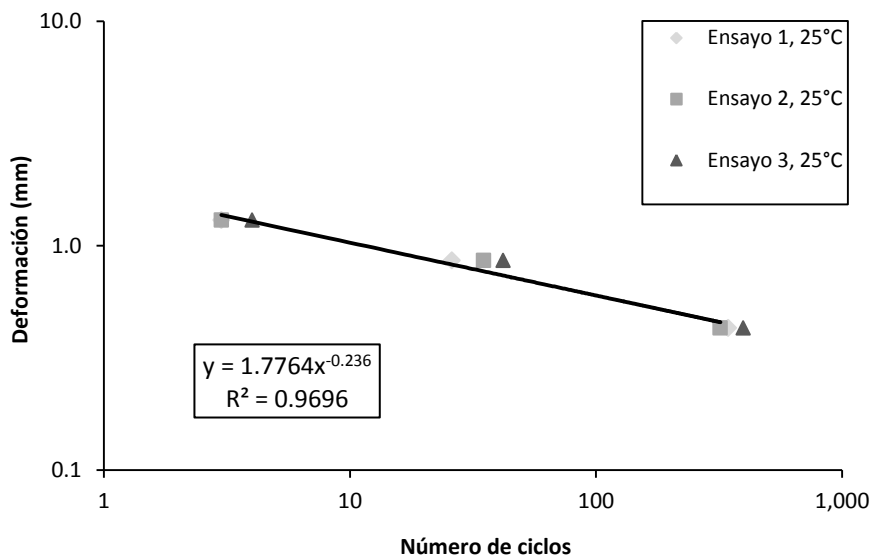


Figura 67. Ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica MDC-2

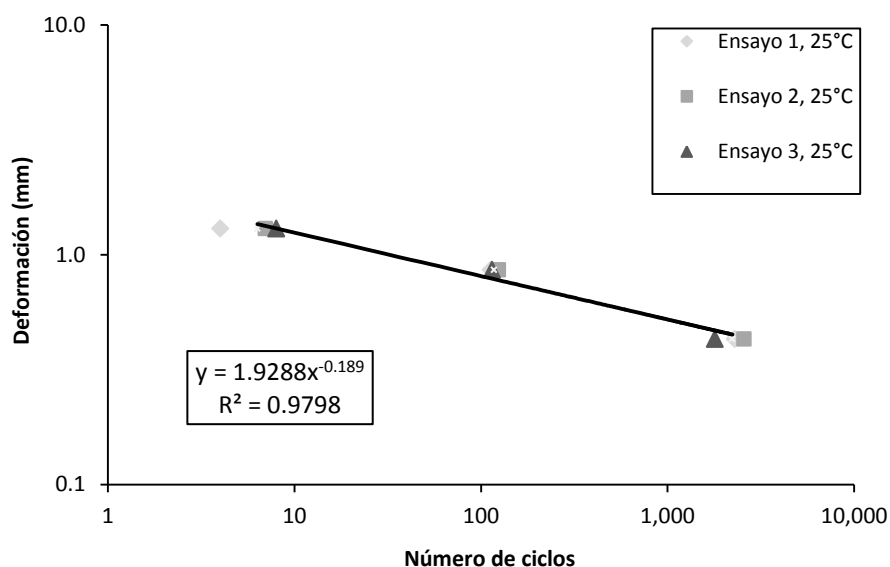


Figura 68. Ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR

Para un nivel de deformación de 0.43 mm en la mezcla convencional, se encontró un promedio de vida de 354 ciclos con una desviación estándar y un coeficiente de variación de 32.1 y 9.1 por ciento, respectivamente. En el caso de la mezcla modificada el promedio fue de 2260 ciclos y la desviación estándar y coeficiente de variación tuvieron valores de 279.0 y 12.3 respectivamente.

Asimismo, para un nivel de deformación de 0.86 mm se obtuvo un promedio de 34 ciclos con una desviación estándar y un coeficiente de variación de 6.5 y 19.1 por ciento para la mezcla convencional y un promedio de 117 ciclos con una desviación estándar y coeficiente de variación de 4.8 y 4.1 por ciento para la mezcla modificada. Los resultados obtenidos para 1.30 mm de deformación fueron descartados debido al bajo número de ciclos necesarios para la falla del material.

En términos generales, el coeficiente de variación de las mezclas asfálticas es menor a 20 por ciento, indicándose claramente que los ensayos son repetibles.

La Figura 69 y la Figura 70 muestran los indicadores estadísticos obtenidos en el ensayo de repetibilidad del equipo construido, para la mezcla convencional y modificada respectivamente.

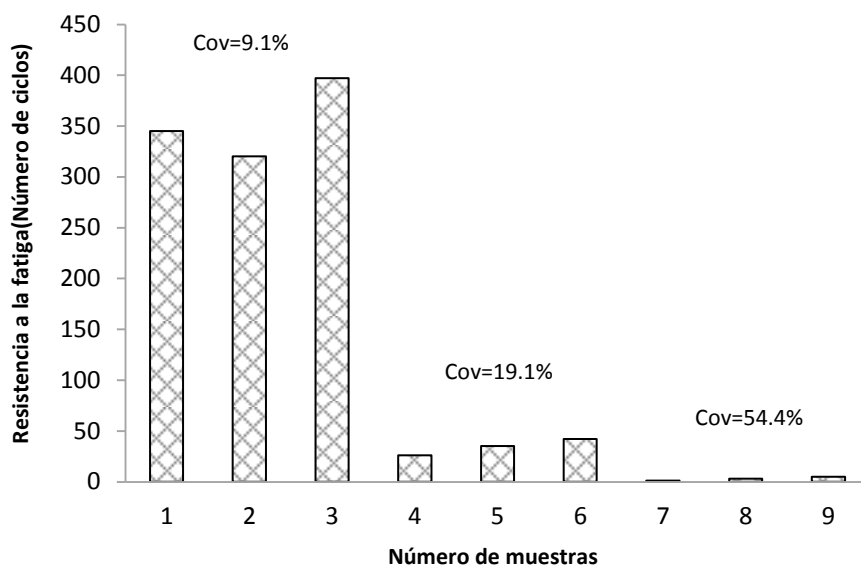


Figura 69. Resultados del ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica MDC-2

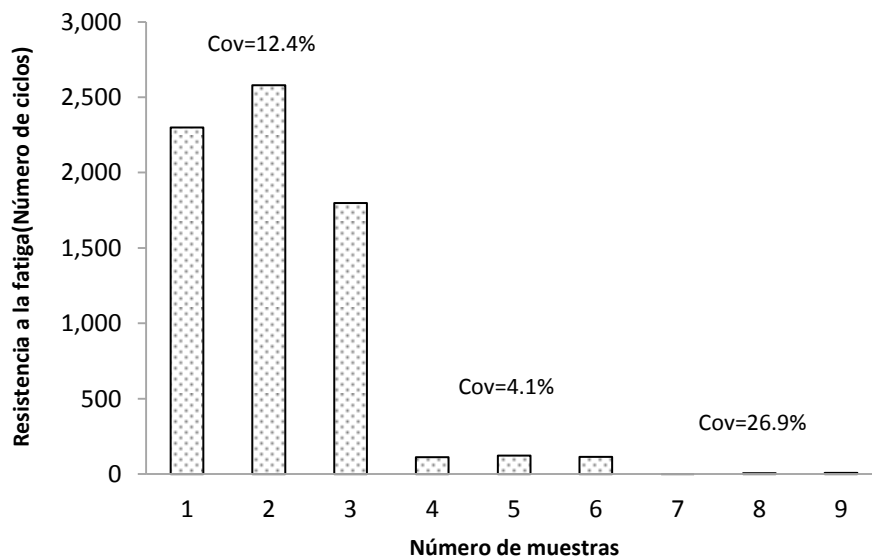


Figura 70. Resultados del ensayo de repetibilidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR

4.6.5.2 Sensibilidad del ensayo con el Equipo de Reflexión

Se realizó un análisis de sensibilidad de las principales variables que intervienen en el ensayo de fatiga con el Equipo de Reflexión. Los parámetros de ensayo: desplazamiento de apertura, temperatura de ensayo y porcentaje de vacíos de aire se evaluaron tanto para la mezcla asfáltica convencional como para la mezcla asfáltica modificada con caucho, con el fin de determinar la incidencia del tipo de mezcla asfáltica utilizada.

Cabe señalar que para cada ensayo, sólo un parámetro fue variable de sensibilidad y los otros se mantuvieron constantes. Los resultados obtenidos del análisis se presentan a continuación.

- **Influencia del desplazamiento de apertura en la fatiga por reflexión**

Se moldearon nueve muestras idénticas con un contenido de vacíos de aire del 4 por ciento para la mezcla con asfalto clasificado por penetración como 80-100 y nueve muestras para la mezcla con asfalto 80-100 modificado con caucho (GCR). El ensayo con el Equipo de Reflexión se realizó a 25°C para tres desplazamientos de apertura: 0.46 mm, 0.83 mm y 1.30 mm, y se utilizaron tres repeticiones para cada desplazamiento con la finalidad de obtener la ley de fatiga para cada mezcla asfáltica evaluada.

La Figura 71 y la Figura 72 muestran el promedio de vida a la fatiga por reflexión, para la mezcla convencional y modificada respectivamente. Estas gráficas indican que la vida de las mezclas asfálticas en caliente disminuye con el aumento de los niveles de desplazamiento, concluyéndose que los resultados de los ensayos con el Equipo de Reflexión son sensibles al desplazamiento de apertura.

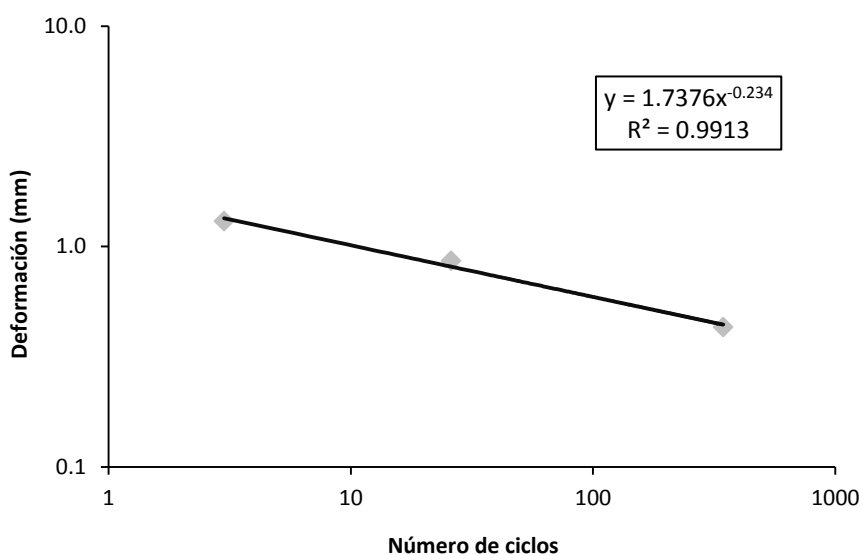


Figura 71. Influencia del desplazamiento de apertura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica convencional

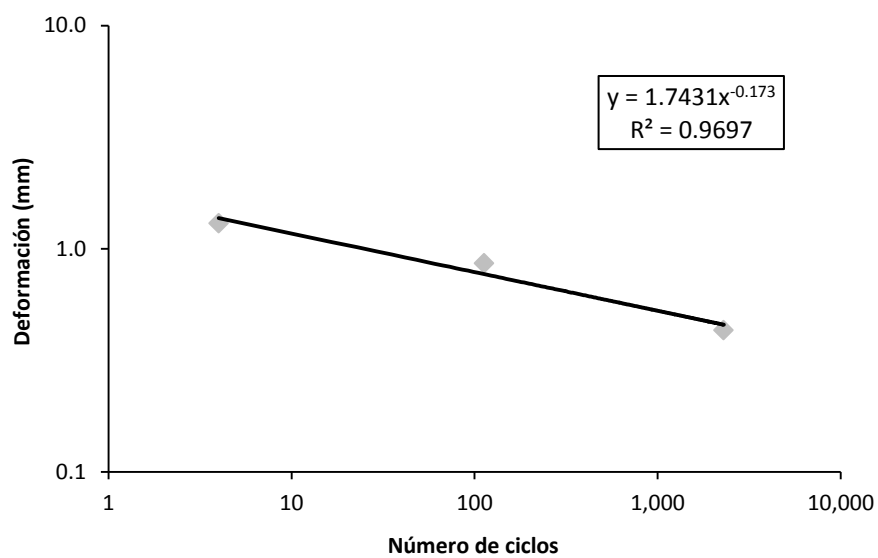


Figura 72. Influencia del desplazamiento de apertura en la fatiga por de la mezcla asfáltica modificada con GCR

- **Influencia de la temperatura en la fatiga por reflexión**

Se evaluaron nueve muestras idénticas con un contenido de vacíos de aire del 4 por ciento para la mezcla asfáltica con ligante asfáltico 80-100. El ensayo con el Equipo de Reflexión se realizó a las temperaturas de 10°C, 25°C y 40°C para tres niveles de desplazamiento: 0.30, 0.63 y 0.89 mm (leyes de fatiga).

La Figura 73 presenta el comportamiento del material que varía de acuerdo a la temperatura de ensayo aplicada. La gráfica muestra la influencia significativa de la temperatura en la vida a fatiga por reflexión de las mezclas asfálticas en caliente, concluyéndose que los ensayos con el Equipo de Reflexión son sensibles a la temperatura.

De la misma manera, se realizó el análisis de sensibilidad a la temperatura para la mezcla modificada con caucho. La Figura 74 presenta la tendencia de las muestras ensayadas, verificándose la influencia de este parámetro en su vida a fatiga.

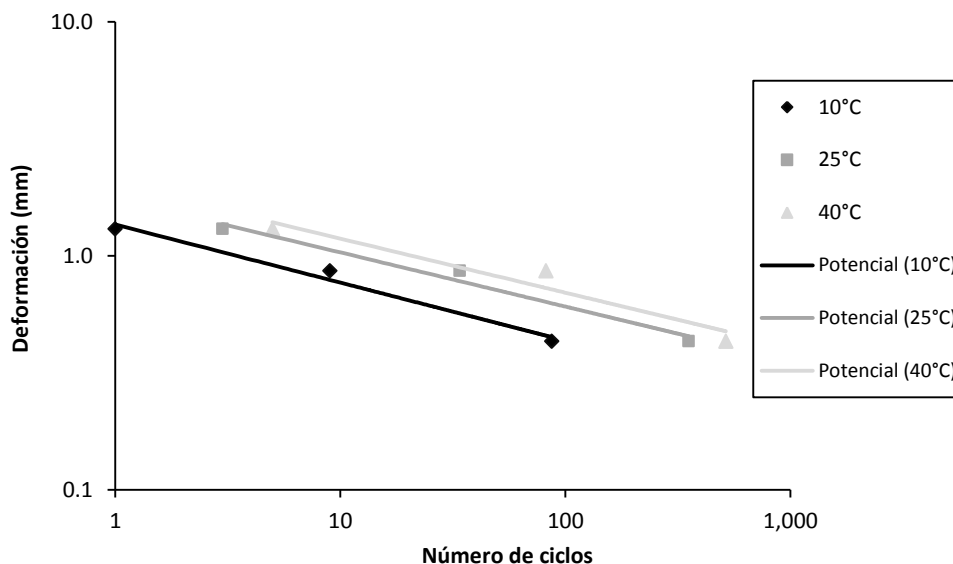


Figura 73. Influencia de la temperatura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica convencional

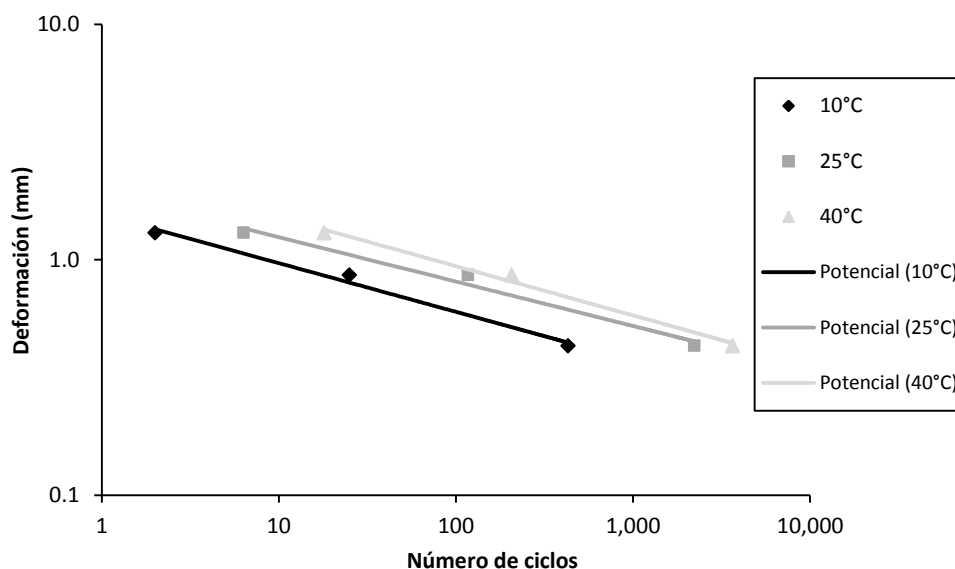


Figura 74. Influencia de la temperatura en la fatiga por reflexión de la mezcla asfáltica modificada con GCR

- **Influencia del tipo de mezcla asfáltica en la fatiga por reflexión**

Para determinar la influencia del tipo de mezcla asfáltica en la vida a fatiga por reflexión, se utilizaron dos mezclas asfálticas elaboradas con asfalto clasificado como 80-100 y asfalto 80-100 modificado con grano de caucho reciclado.

La Figura 75 muestra la superposición de las gráficas anteriores y representa el aumento significativo en la vida a fatiga por reflexión de las mezclas asfálticas en caliente modificadas con caucho con respecto a las convencionales, para cada uno de los niveles de deformación utilizados. Asimismo, para las leyes de fatiga obtenidas en estos ensayos, la pendiente de las muestras asfálticas modificadas fue menor a las calculadas para las muestras con ligante asfáltico convencional, concluyéndose el buen desempeño del caucho en el comportamiento a fatiga de los materiales y que los resultados de los ensayos con el Equipo de Reflexión son sensibles al tipo de mezcla evaluada.

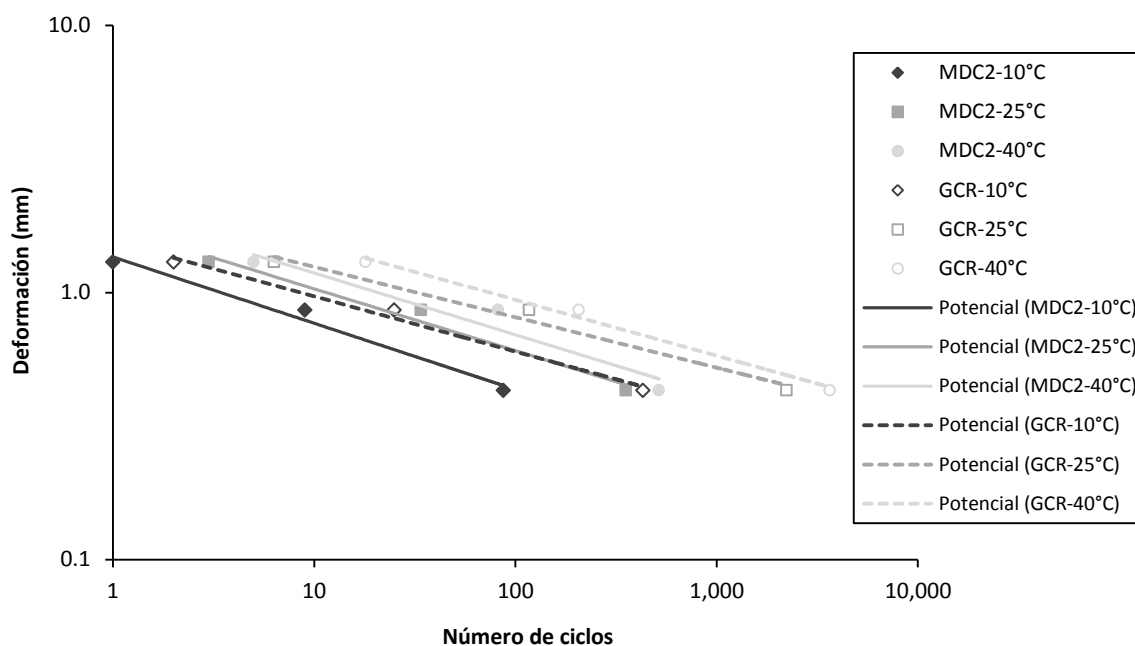


Figura 75. Influencia del tipo de mezcla asfáltica en la fatiga por reflexión

- Influencia de los vacíos de aire en la fatiga por reflexión**

Se moldearon nueve muestras con porcentajes de vacíos de aire de hasta 4 ± 5 por ciento para la mezcla asfáltica convencional y nueve muestras para la mezcla asfáltica modificada con caucho (GCR). El ensayo con el Equipo de Reflexión se realizó a 25°C para tres niveles de desplazamiento de apertura: 0.46 mm, 0.83 mm y 1.30 mm con el fin de obtener las leyes de fatiga correspondientes.

La Figura 76 y la Figura 77 presentan la influencia del contenido de vacíos de aire sobre la vida a fatiga por reflexión, obteniéndose una mejor resistencia con las muestras que presentan menor rigidez y mayores porcentajes de vacíos de aire. Vale la pena resaltar que para obtener una tendencia clara de la variación de la vida a fatiga de los materiales de acuerdo a su porcentaje de densificación deben realizarse ensayos adicionales con niveles de vacíos de aire idénticos para todas las pruebas y que estos porcentajes deben diferir significativamente entre ellos.

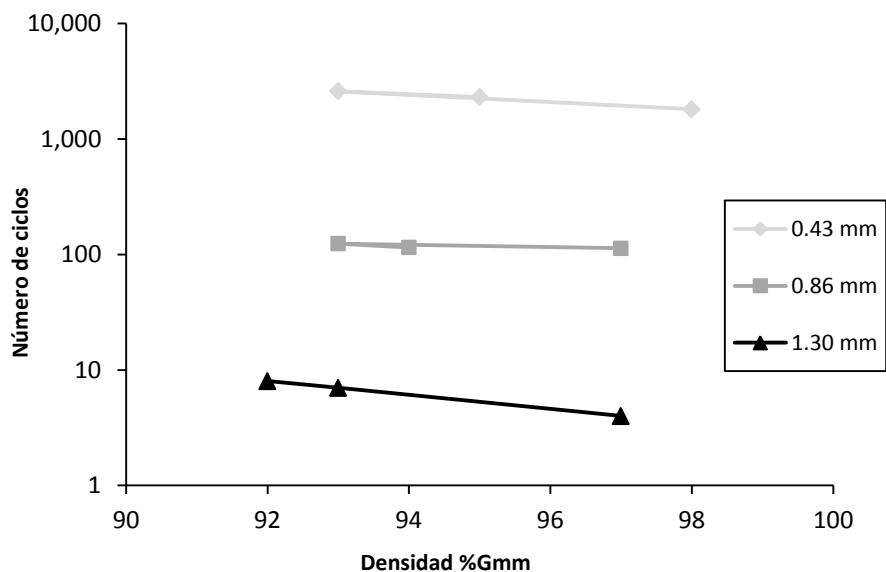


Figura 76. Variación de la fatiga por reflexión según la densidad para la mezcla asfáltica MDC-2

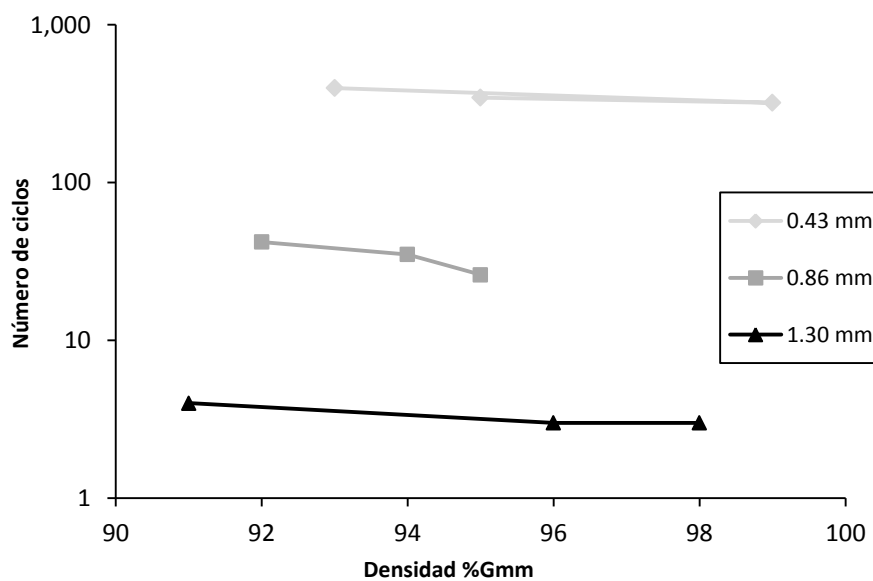


Figura 77 Variación de la fatiga por reflexión según la densidad para la mezcla asfáltica modificada con GCR

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ENSAYOS DE RIGIDEZ DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para medir la rigidez de las muestras asfálticas analizadas, tanto para la mezcla MDC2 como la modificada con GCR, se realizaron los ensayos de módulo dinámico en el equipo MTS y de módulo resiliente en el equipo NAT. Es importante destacar que el módulo de un material es uno de los parámetros más importantes debido a que suministra información sobre el comportamiento dinámico de las mezclas.

La Tabla 24 muestra el resumen de los módulos dinámicos obtenidos tanto para la mezcla asfáltica MDC-2 como para la mezcla asfáltica modificada con GCR.

Tabla 24. Resultados de los módulos dinámicos para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2		Mezcla modificada con GCR	
		Módulo (MPa)	Coefficiente variación (%)	Módulo (MPa)	Coefficiente variación (%)
5	1	7640	4.2	5893	10.5
5	4	10779	2.6	8299	10.8
5	16	14398	4.0	11537	8.3
25	1	1571	9.3	1156	18.1
25	4	2666	8.6	1804	19.2
25	16	4427	2.7	2750	19.4
40	1	505	14.5	501	9.6
40	4	683	17.8	657	15.4
40	16	1010	20.4	810	17.2

Asimismo, la Tabla 25 presenta los módulos resilientes obtenidos, por cada combinación de temperatura y frecuencia de aplicación de carga, tanto para la mezcla MDC-2 como para la mezcla modificada con GCR.

Tabla 25. Resultados de los módulos resilientes para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	X	Mezcla MDC-2		Mezcla modificada con GCR	
			Módulo (MPa)	Coefficiente variación (%)	Módulo (MPa)	Coefficiente variación (%)
10	2.50	0.92	9710	4.8	6843	6.7
10	5.00	1.61	10916	2.2	8400	7.8
10	10.00	2.30	12825	1.5	9713	8.2
20	2.50	-2.12	3582	6.4	2686	1.7
20	5.00	-1.43	4934	6.3	3460	5.7
20	10.00	-0.73	5960	3.6	4393	1.6
30	2.50	-4.96	1011	10.8	999	0.7
30	5.00	-4.26	1398	9.4	1299	4.3
30	10.00	-3.57	2033	9.4	1768	3.4

De los resultados obtenidos para ambos ensayos se aprecia que el comportamiento de las muestras está relacionado con la temperatura y la velocidad a la que se aplica el esfuerzo, más concretamente, a altas temperaturas y tiempos de aplicación largos el módulo es bajo, mientras que a bajas temperaturas y tiempos cortos de aplicación de la carga el módulo fue alto.

Al comparar los valores de módulo dinámico obtenidos para ambas mezclas asfálticas se observa una reducción en los resultados de la mezcla con caucho. Esta reducción disminuye notablemente a la temperatura de 40°C demostrando la baja susceptibilidad a la temperatura del asfalto con caucho. El porcentaje promedio para las temperaturas de 5°C y 25°C fue del 73% mientras que para 40°C se registró el 92%. El promedio de reducción de la rigidez de la mezcla con GCR con respecto a la mezcla MDC-2 fue del 80%, como se aprecia en la Tabla 26.

Tabla 26. Comparación de los módulos dinámicos entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Porcentaje de reducción GCR/MDC-2 (%)
		Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	
5	1	7640	5893	77
5	4	10779	8299	77
5	16	14398	11537	80
25	1	1571	1156	74
25	4	2666	1804	68
25	16	4427	2750	62
40	1	505	501	99
40	4	683	657	96
40	16	1010	810	80

De igual manera, para el ensayo de módulo resiliente se obtuvieron valores menores para las briquetas con asfalto modificado con respecto a las briquetas con mezcla MDC-2. El porcentaje de disminución para las temperaturas de 10°C y 20° fueron similares con un promedio de 74%, mientras que el promedio para la temperatura de 40°C se registró en el 93%, demostrando la poca susceptibilidad a las temperaturas elevadas por parte de las mezclas modificadas con GCR. La Tabla 27 presenta los resultados expuestos.

Tabla 27. Comparación de los módulos resilientes entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	X	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Porcentaje de reducción GCR/MDC-2 (%)
			Módulo (MPa)	Módulo (MPa)	
10	2.50	0.92	9710	6843	70
10	5.00	1.61	10916	8400	77
10	10.00	2.30	12825	9713	76
20	2.50	-2.12	3582	2686	75
20	5.00	-1.43	4934	3460	70
20	10.00	-0.73	5960	4393	74
30	2.50	-4.96	1011	999	99
30	5.00	-4.26	1398	1299	93
30	10.00	-3.57	2033	1768	87

Como se aprecia en las tablas anteriores, el comportamiento de los materiales en ambos ensayos es el mismo, los porcentajes de reducción de la rigidez para las mezclas modificadas tiene valores prácticamente iguales. Con respecto a los valores registrados en ambos ensayos, al disponer de curvas maestras para el ensayo en el equipo NAT, se calcularon los valores de módulos resilientes con las frecuencias y temperaturas utilizadas en el actuador dinámico MTS para ser comparados, como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28. Comparación entre los módulos dinámicos y módulos resilientes para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2		Mezcla con GCR		Promedio de relación Res/Din (%)
		M. Dinámico (MPa)	M. Resiliente (MPa)	M. Dinámico (MPa)	M. Resiliente (MPa)	
5	1	7640	(1)	5893	(1)	-
5	4	10779	(1)	8299	(1)	-
5	16	14398	(1)	11537	(1)	-
25	1	1571	1712	1156	1283	110
25	4	2666	2879	1804	2093	112
25	16	4427	4825	2750	3273	114
40	1	505	535	501	592	112
40	4	683	717	657	808	114
40	16	1010	1050	810	907	108

(1) No se consideran representativos los valores extrapolados de módulos resilientes a partir de las curvas maestras, para bajas temperaturas.

Con el porcentaje promedio de ambos tipos de mezclas se obtuvo una relación igual al 112% para los módulos resilientes con respecto a los módulos dinámicos. El mayor porcentaje de los módulos resilientes puede explicarse a los tiempos de descanso que experimenta el material durante el ensayo mientras que en el caso del módulo dinámico los ciclos de carga y descarga son constantes sin considerar períodos de reposo.

5.2 ENSAYOS DE FATIGA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Para determinar la resistencia a la fatiga de las muestras asfálticas analizadas, tanto para la mezcla MDC2 como la modificada con GCR, se realizaron los ensayos de fatiga en el equipo NAT y en el Banco de Fatiga. El deterioro causado por la fatiga es uno de los más frecuentes que se presenta cuando los materiales son sometidos a repeticiones de carga causando la aparición de fisuras.

La Tabla 29 muestra los resultados obtenidos del ensayo de fatiga por esfuerzo controlado en el equipo NAT. La tabla presenta los niveles de esfuerzos aplicados así como la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas, tanto para la mezcla asfáltica MDC-2 como para la mezcla asfáltica modificada con GCR.

Tabla 29. Resultados de los ensayos de fatiga en equipo NAT para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2		Mezcla con GCR	
		Esfuerzo (kPa)	Número de ciclos hasta la Falla	Esfuerzo (kPa)	Número de ciclos hasta la falla
20	2.5	250	28,055	400	1,513
20	2.5	500	1,090	400	1,557
20	2.5	350	4,038	500	1,039
20	2.5	400	3,021	200	58,510
20	2.5	450	1,514	250	11,008
20	2.5	300	6,504	300	9,526
20	2.5	250	13,042	150	967,044
20	2.5	150	191,536	350	9,531
20	2.5	150	113,039	500	1,035

Asimismo, la Tabla 30 presenta los resultados obtenidos del ensayo de fatiga por deformación controlada en el Banco de Fatiga. La tabla muestra la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas, tanto para la mezcla convencional MDC-2 como para la mezcla modificada con GCR.

Tabla 30. Resultados de los ensayos de fatiga en Banco de Fatiga para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Deformación (10 ⁻⁶ m)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR
			Número de ciclos hasta la falla	Número de ciclos hasta la falla
19	10	90	11,234,534	47,518,279
19	10	90	11,564,289	44,566,207
19	10	90	10,674,329	48,804,550
19	10	90	12,545,765	50,100,774
19	10	150	3,765,876	9,719,306
19	10	150	2,956,432	7,992,498
19	10	150	2,476,349	9,686,402
19	10	150	3,257,689	8,490,826
19	10	220	508,943	752,795
19	10	220	294,056	1,025,227
19	10	220	423,535	931,673
19	10	220	456,294	882,375

De los resultados de fatiga obtenidos con ambos equipos se aprecia que el comportamiento de las muestras está relacionado directamente con el nivel de esfuerzo constante o deformación constante aplicados. A mayor nivel de esfuerzo la resistencia a la fatiga disminuye; asimismo, a mayor nivel de deformación utilizado la vida a fatiga decrece.

Para comparar la resistencia a la fatiga obtenida para ambas mezclas asfálticas en el equipo NAT, se listaron los números de ciclos o repeticiones de acuerdo al mismo nivel de esfuerzo aplicado. De los resultados se observa un aumento en los valores correspondientes a las briquetas con mezcla asfáltica modificada con caucho. Esta diferencia incrementa notablemente la vida a fatiga de las mezclas modificadas con GCR con relación a las mezclas MDC-2 en un porcentaje promedio de 220%.

La Tabla 31 presenta la relación entre la vida a fatiga de la mezcla modificada con caucho y la mezcla asfáltica MDC-2.

Tabla 31. Comparación de la vida a fatiga en equipo NAT entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Esfuerzo (kPa)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Promedio de relación GCR/MDC-2 (%)
			Número de ciclos hasta la Falla	Número de ciclos hasta la falla	
20	2.5	150	113,039	-	-
20	2.5	150	191,536	967,044	505
20	2.5	250	13,042	-	-
20	2.5	250	28,055	58,510	209
20	2.5	300	6,504	9,526	146
20	2.5	350	4,038	9,531	236
20	2.5	400	3,021	-	-
20	2.5	450	1,514	1,557	103
20	2.5	500	1,090	1,039	95

De igual manera, para el ensayo de fatiga en Banco de Fatiga se obtuvieron valores mayores para las briquetas con asfalto modificado con respecto a las briquetas con mezcla MDC-2. La relación entre ambas mezclas muestra un valor promedio de 320 %, demostrando claramente la mayor vida por fatiga por parte de las mezclas con caucho. La Tabla 27 presenta los resultados expuestos.

Tabla 32. Comparación de la vida a fatiga en Banco de Fatiga entre las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Deformación (10 ⁻⁶ m)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Promedio de relación GCR/MDC-2 (%)
			Número de ciclos hasta la falla	Número de ciclos hasta la falla	
19	10	90	11,234,534	47,518,279	423
19	10	90	11,564,289	44,566,207	385
19	10	90	10,674,329	48,804,550	457
19	10	90	12,545,765	50,100,774	399
19	10	150	3,765,876	9,719,306	258
19	10	150	2,956,432	7,992,498	270
19	10	150	2,476,349	9,686,402	391
19	10	150	3,257,689	8,490,826	261
19	10	220	508,943	752,795	148
19	10	220	294,056	1,025,227	349
19	10	220	423,535	931,673	220
19	10	220	456,294	882,375	193

Como se aprecia en las tablas anteriores, el comportamiento de los materiales en ambos ensayos es el mismo, se cuenta con mayores porcentajes de resistencia a fatiga para las mezclas modificadas con GCR.

No se puede realizar una comparación directa de repeticiones medidas hasta la falla debido a que los ensayos son a esfuerzo y deformación controlados, de igual manera las frecuencias de ensayo utilizadas fueron diferentes. Sin embargo, se compararon los parámetros de pendientes de fatiga calculados que brindan una tendencia clara de la vida a fatiga para cada mezcla analizada según el equipo de laboratorio utilizado.

La Tabla 33 presenta el resumen de las pendientes de fatiga obtenidas en ambos equipos para los dos tipos de mezcla ensayados.

Tabla 33. Comparación entre las pendientes de fatiga obtenidas para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2		Mezcla con GCR		Promedio de reducción (%)
		Fatiga NAT $\sigma_6 - \epsilon_6$	Fatiga Banco b	Fatiga NAT $\sigma_6 - \epsilon_6$	Fatiga Banco b	
20	2.5	97	-0.235	135	-0.176	75
19	10	181	-0.258	224	-0.220	85

Como se aprecia en las pendientes de fatiga, las mezclas modificadas con GCR presentan valores menores que las mezclas MDC-2, indicando la mayor resistencia a la fatiga por parte de las mezclas con caucho. Este comportamiento se presentó para los ensayos realizados con ambos equipos siendo el promedio de reducción igual al 80%. Si bien no se comparó la relación entre las pendientes de un mismo tipo de mezcla, se observa claramente una proporción entre los valores obtenidos con cada uno de los equipos de fatiga.

Complementariamente, para los ensayos de fatiga se consideró un tercer equipo que aplica ciclos de apertura y oclusión por tracción directa. La Tabla 34 muestra los resultados obtenidos del ensayo de fatiga por deformación controlada en el Equipo de Reflexión. La tabla presenta las temperaturas y los niveles de deformación aplicados así como la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas, tanto para la mezcla asfáltica MDC-2 como para la mezcla asfáltica modificada con GCR.

Tabla 34. Resultados de los ensayos de fatiga en Equipo de Reflexión para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Período (s)	Amplitud (mm)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Promedio de relación GCR/MDC-2 (%)
			Número de ciclos hasta la falla	Número de ciclos hasta la falla	
10	10	0.43	87	430	494
10	10	0.86	9	25	278
10	10	1.30	1	2	200
25	10	0.43	354	2227	629
25	10	0.86	34	117	345
25	10	1.30	3	6	211
40	10	0.43	517	3650	706
40	10	0.86	82	207	252
40	10	1.30	5	18	360

Se observa en la tabla que la mezcla modificada con caucho presenta un comportamiento más resistente a la fatiga, traducido en valores mayores de repeticiones antes de la falla. Asimismo, se aprecia que esta diferencia es mayor para los niveles de deformación bajos siendo la relación entre ambas mezclas del orden de 1 a 4 aproximadamente.

La Tabla 35 presenta la comparación de las leyes de fatiga entre la mezcla asfáltica MDC-2 y la mezcla modificada con GCR, obtenidas con los tres equipos de laboratorio.

Tabla 35. Comparación entre las pendientes de fatiga obtenidas para las mezclas asfálticas MDC-2 y modificada con GCR

Temperatura (°C)	Frecuencia (Hz)	Mezcla MDC-2	Mezcla con GCR	Promedio de reducción (%)
		Fatiga Banco b	Fatiga Banco b	
20	2.5	-0.235	-0.176	75
19	10	-0.258	-0.220	85
25	0.1	-0.236	-0.188	80

Como se observa en la tabla los valores de las pendientes de fatiga para los tres equipos utilizados presentan valores menores en las mezclas modificadas con caucho en comparación con mezclas MDC-2, indicando una mayor medida de la vida esperada de la mezcla asfáltica modificada por su resistencia a la fatiga. El porcentaje promedio de reducción para las pendientes de fatiga de las mezclas MDC-2 se registró en el 80%

Al analizar los resultados de fatiga obtenidos con los tres equipos, se aprecia que las pendientes de fatiga entre el equipo NAT y el Equipo de Reflexión presentan valores muy similares, infiriéndose un mejor ajuste entre ambos equipos. Si bien es cierto que tanto el Banco de Fatiga como el Equipo de Reflexión operan con deformación controlada y tres niveles de desplazamiento seleccionados, los resultados de las pendientes de fatiga difieren en magnitud; sin embargo, es importante continuar con una investigación delimitada a la correlación de los resultados de fatiga entre estos equipos, en la cual los parámetros de entrada como temperaturas, frecuencias y criterios de falla sean los mismos.

6 DISCUSIÓN

Zhou *et al.* (2003) del Instituto de Transporte de Texas (TTI) utilizaron el equipo Overlay Tester que había sido mejorado de su versión inicial diseñada por Lytton *et al.* (1979), para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas a fatiga por reflexión. Dentro de los parámetros de ensayo más importantes se incluyen el período, la amplitud y la fuerza aplicada.

El equipo mejorado se ensayó en el modo de desplazamiento controlado siendo su principal resultado la vida debido a la fatiga por reflexión de una mezcla asfáltica en caliente traducida en el número de ciclos para lograr la falla o rotura total de la muestra. La Tabla 36 muestra las características que rigen el ensayo.

Tabla 36. Características de ensayo con el Overlay Tester

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura	°C	25
Desplazamiento	mm	0.63
Período	s	10

Fuente: Zhou *et al.* (2003)

De los resultados de los ensayos cíclicos realizados se estableció que el criterio de falla para determinar la resistencia a la fatiga por reflexión fue de 300 ciclos bajo las características descritas en la tabla anterior y para las mezclas asfálticas densas en caliente o de gradación continua, (Zhou *et al.*, 2003).

El presente proyecto considera para los ensayos un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencias de carga y se mide el número de ciclos necesarios para lograr la fatiga del material.

La metodología de ensayo se basó en el procedimiento americano utilizado para el equipo Overlay Tester pero contempló el uso de tres temperaturas: 10°C, 25°C y 40°C para un período de 10 s, con tres niveles de deformación: 0.43 mm, 0.86 mm y 1.30 mm, con la finalidad de obtener inicialmente las leyes de fatiga para la cada tipo de mezcla evaluada y luego establecer un criterio de falla para una condición de ensayo en particular.

La Tabla 37 muestra los resultados obtenidos del ensayo de fatiga por deformación controlada en el Equipo de Reflexión, asimismo presenta las temperaturas y los niveles de deformación aplicados así como la cantidad de ciclos requeridos hasta la falla de las briquetas demostrando la influencia del desplazamiento de apertura y de la temperatura de ensayo en la vida útil a fatiga por reflexión de los materiales asfálticos.

Tabla 37. Resultados de los ensayos de fatiga en Equipo de Reflexión

Temperatura	Período	Amplitud	Número de ciclos
(°C)	(s)	(mm)	hasta la falla
10	10	0.43	87
10	10	0.86	9
10	10	1.30	1
25	10	0.43	354
25	10	0.86	34
25	10	1.30	3
40	10	0.43	517
40	10	0.86	82
40	10	1.30	5

Por lo anterior, al no tener calibrados los valores de los parámetros de ensayo como la amplitud y el período, que representen las condiciones reales que experimentan las losas de concreto en la ciudad de Bogotá, con el objetivo de poder establecer un criterio de falla (número de ciclos) que debe cumplir la mezcla para considerarse óptima durante su período de servicio como sobrecarpeta asfáltica, el presente proyecto presenta como alternativa la caracterización de mezclas debido a su resistencia a la fatiga por reflexión para cualquier combinación de temperaturas y amplitudes de desplazamiento.

La finalidad es establecer una curva "maestra" para el ensayo de fatiga por reflexión, combinando las amplitudes utilizadas, los períodos ingresados y los niveles de deformación contemplados, para una gran cantidad de briquetas ensayadas con condiciones distintas que reflejen el comportamiento de los pavimentos rígidos rehabilitados con sobrecarpetas de mezcla asfáltica. Para lograr este objetivo es necesario implementar un sistema de instrumentación en las losas de pavimento rígidos, para calcular los parámetros de apertura y oclusión (amplitud y período) producidos por el gradiente térmico que caracteriza a los pavimentos de Bogotá.

La adecuada instrumentación de pavimentos rígidos con sobrecarpetas flexibles permitirá determinar unos parámetros objetivos de ensayo para establecer un criterio de falla que garantice una adecuada correlación entre el número de ciclos de vida por fatiga obtenido en el Equipo de Reflexión del laboratorio y el número de años de vida esperada por la fatiga en el campo, garantizando de esta manera la resistencia de las mezclas asfálticas al efecto de la fatiga por reflexión.

7 CONCLUSIONES

- Se implementó en laboratorio un equipo capaz de caracterizar las mezclas asfálticas respecto a su resistencia al efecto de fatiga por reflexión, permitiendo el estudio de nuevos materiales que absorban esfuerzos efectivos, refuercen las capas asfálticas y resistan la formación y propagación de fisuras.
- Los procedimientos para el ensayo de reflexión fueron propuestos y registrados. De igual manera, el manual de operación del software, especificaciones técnicas del equipo y manual para preparación de muestras fueron documentados en el presente proyecto.
- Se verificó la repetibilidad de los ensayos en el Equipo de Reflexión para los valores de deformación de 0.86 mm y 1.3 mm obteniéndose coeficientes de variación menores al 25%. Asimismo, se demostró la sensibilidad de la vida a fatiga por reflexión con respecto a las variables de nivel de deformación, temperatura y tipo de mezcla asfáltica.
- Para el diseño de las mezclas asfálticas se utilizó el protocolo Superpave Nivel 1. De los resultados volumétricos obtenidos, se tiene un mayor porcentaje de vacíos de aire y en el agregado mineral para la mezcla modificada con GCR.
- El grano de caucho reciclado (GCR) obtenido de las llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas

en lo concerniente a la disminución de la susceptibilidad térmica del ligante, mejor comportamiento ante la acción del agua, mitigación del ahuellamiento del pavimento a altas temperaturas y mejoras en la resistencia al fisuramiento por fatiga, aumentando la vida útil de la estructura.

- La resistencia a la fatiga por reflexión obtenida para la mezcla asfáltica modificada con GCR tuvo mejores resultados que la MDC-2, soportando mayor número de repeticiones antes de la fatiga del material. Para el nivel de deformación más bajo (0.43 mm) se obtuvo desde un 278% hasta un 706% de mejoras en la vida a fatiga, para niveles superiores (0.86 y 1.30 mm) los resultados evidenciaron un promedio de 275% de aumento en los ciclos aplicados.
- Con respecto a la relación entre los ensayos de fatiga realizados a las mezclas asfálticas, la tendencia obtenida para los tres equipos es similar, demostrándose el mejor comportamiento a fatiga por parte de la mezcla modificada con caucho, que en todos los casos presentó valores menores para las pendientes de fatiga.
- Al analizar los resultados de fatiga obtenidos con los tres equipos, se aprecia que las pendientes de fatiga entre el equipo NAT y el Equipo de Reflexión presentan valores muy similares, infiriéndose un mejor ajuste inicial entre ambos equipos, sin embargo, es importante continuar con una investigación delimitada a la correlación de los resultados de fatiga entre estos equipos.

8 RECOMENDACIONES

- Debido a la baja resistencia de las mezclas asfálticas densas para rodadura, se recomienda evaluar el desempeño a fatiga por reflexión de mezclas con mayores porcentajes de vacíos y mezclas con granulometrías discontinuas.
- Con el objetivo de estudiar nuevos materiales que disipen los esfuerzos por tracción directa producidos en la fibra inferior de las sobrecarpetas asfálticas, es necesario evaluar mezclas con porcentajes de asfalto mayores al calculado en el presente proyecto; asimismo, se recomienda evaluar el uso de geomallas, geotextiles, sistemas SAMI, mallas de poliéster y de acero, para cuantificar de manera objetiva los beneficios que estas brindan en la resistencia a fatiga por reflexión de las mezclas asfálticas.
- Se recomienda implementar un sistema de refrigeración al equipo de reflexión con la finalidad de evaluar el comportamiento de fatiga de mezclas asfálticas a bajas temperaturas, es decir temperaturas menores a la ambiente.
- Si se desea establecer la curva maestra para la fatiga por reflexión, es necesario continuar específicamente con los ensayos de fatiga por reflexión, con el número necesario de ensayos que permitan combinar las amplitudes utilizadas, los períodos ingresados y los niveles de deformación contemplados. Se sugiere inicialmente utilizar un ajuste lineal para la obtención de la curva maestra.

- Se sugiere implementar un sistema de instrumentación en losas de pavimento rígidos rehabilitadas con sobrecarpetas de mezcla asfáltica, para calcular los parámetros de apertura y oclusión (amplitud y período) que caracteriza a los pavimentos de Bogotá.
- La adecuada instrumentación de pavimentos rígidos con sobrecarpetas flexibles permitirá establecer una correlación entre el número de ciclos de vida por fatiga obtenido en el Equipo de Reflexión del laboratorio y el número de años de vida esperada por la fatiga en el campo. Complementariamente, se recomienda extraer núcleos de pavimento de diferentes edades para obtener sus densidades y evaluar su resistencia a fatiga por reflexión.
- El estudio progresivo de la caracterización de mezclas debido a su resistencia a la fatiga por reflexión permitirá establecer, para cualquier combinación de frecuencias y temperaturas, un criterio de falla (número ciclos) que debe cumplir la mezcla para considerarse óptima durante su período de diseño, a partir de la validación con núcleos de campo con desempeño conocido.
- Se recomienda realizar mayor cantidad de ensayos en el equipo NAT con el propósito de evaluar una correlación entre la fatiga por tracción indirecta y la fatiga por reflexión.
- Debido al constante cambio en la calidad de los asfaltos se recomienda efectuar los ensayos de laboratorio sugeridos en la presente metodología y cuando cambien las propiedades de los materiales se debe procurar diseñar nuevamente las mezclas asfálticas.

9 BIBLIOGRAFÍA

Button, J. W., and Epps, J. A. (1982). "Evaluation of Fabric Interlayers," Texas Transportation Institute, Research Report 261-2, the Texas A&M University System, College Station, Texas.

Button, J. W., and Lytton, R. L. (1987). "Evaluation of Fabric, Fibers, and Grids in Overlays". Proceedings of the Sixth International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements, the University of Michigan, Vol. 1, pp. 925-934.

Cleveland, G. S., Lytton, R. L., and Button, J. W. (2003). "Reinforcing Benefits of Geosynthetic Materials in Asphalt Concrete Overlays using Pseudo Strain Damage Theory". In Transportation Research Record 1849. CD-ROM. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Dempsey, B. J. (2002). "Development and Performance of Interlayer Stress Absorbing Composite (ISAC) in AC Overlays". In Transportation Research Record 1809, TRB, National Research Council pp. 175-183.

Di Benedetto, H, Neji, J, Antoine, J. P, and Pasquier, M. (1993). "Apparatus for Laboratory Study of Cracking Resistance," Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 179-186.

Dumas, Ph., and Vecoven, J. (1993). "Processes Reducing Reflective Cracking; Synthesis of Laboratory Tests," Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 246-253.

Gaarkeuken, G., Scarpas, A., and de Boundt, A. H. (1996). "Causes and Consequences of Secondary Cracking," Road and Railway Research Laboratory, Report 7-96-203-23, Delft University of Technology.

Gallego, J., and Prieto, J. N. (2006). "Development of New Laboratory Equipment for the Study of Reflective Cracking in Asphalt Overlays," In Asphalt Overlays and Infrastructure Distress. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Germann, F. P. and Lytton, R. L. (1979). "Methodology for Predicting the Reflection Cracking Life of Asphalt Concrete Overlays," Texas Transportation Institute, Research Report FHWA/TX-79/09+207-5, College Station. Springfield, Virginia.

Gibney, A., Lohan, G., and Moore, V. (2002). "Laboratory Study of Resistance of Bituminous Overlays to Reflective Cracking," In Transportation Research Record 1809, TRB, National Research Council pp. 184-190.

Grzybowska, W., Wojtowicz, J., and Fonferko, L. C. (1993). "Application of Geo-Synthetics to Overlays in Cracow Region of Poland," Reflective Cracking in Pavements, State of the Art and Design Recommendations, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 290-298.

Instituto de Desarrollo Urbano (2002). "Estudio de las Mejoras Mecánicas de Mezclas Asfálticas con Desechos de Llantas". Contrato IDU-366-01, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Colombia.

Instituto Nacional de Vías (2007). "Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras". Colombia.

Marchand, J. P., and Goacolou, H. (1982). "Cracking in Wearing Courses". Proceedings of the Fifth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. Delft.

Montestruque, G., Rodrigues, R., Nods, M., and Elsing, A. (2004). "Stop of Reflection Crack Propagation with the Use of Pet Geogrid as Asphalt Overlay Reinforcement," Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Proceedings of the Fifth International RILEM Conference, Lomoges, France, pp. 231-238.

Nynas (2010). "Resistiendo el Agrietamiento Reflectante en Pavimentos Compuestos" en Performance, Edición 1-2010, pp. 8-9.

Pickett, D. L., and Lytton, R. L. (1983). "Laboratory Evaluation of Selected Fabrics for Reinforcement of Asphaltic Concrete Overlays," Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System, Research Report 261-1, College Station, Texas.

Sobhan, T., Crooks, T., Tandon, T., and Mattingly, S. (2004). "Laboratory Simulation of the Growth and Propagation of Reflection Cracks in Geogrid Reinforced Asphalt Overlays," Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Proceedings of the Fifth International RILEM Conference, Lomoges, France, pp. 589-596.

Tamagny, P., Wendling, L., and Piau, J. M. (2004). "A New Explanation of Pavement Cracking from Top to Bottom: The Visco-elasticity of Asphalt Materials," Cracking in Pavements, Mitigation, Risk Assessment and Prevention, Proceedings of the Fifth International RILEM Conference, Lomoges, France, pp. 425-432.

Tschegg, E. K, Stanzl-Tschegg, S. E., and Litzka, J. (1993). "New Testing Method to Characterize Mode 1 Fracturing of Asphalt Aggregate Mixtures," Reflective Cracking in Pavements, State of the Art Recommendations, Proceedings of the Second International RILEM Conference, Liege, Belgium, pp. 263-270.

Von Quintus, H. L. (2009). "Techniques for Mitigation of Reflective Cracks". Technical Guide APTP 05-04. Airfield Asphalt Pavement Technology Program.

Zhou, F., Scullion, T., and Williammee, R. (2003). "Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test," In Pavement Management, Design, and Testing. CD-ROM. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.

Zhou, F., and Scullion, T. (2005). "Overlay Tester: A Rapid Performance Related Crack Resistance Test," Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System, Report FHWA/TX-05/0-4667-2, Austin, Texas.

Zhou, F., and Scullion, T., (2005). "Developing Upgraded Overlay Tester System to Characterize the Reflection Cracking Resistance of Asphalt Concrete: Summary Report," Texas Transportation Institute, the Texas A&M University System, College Station, Texas.

Zhou, F., and Sun, L. (2002). "Reflection Cracking in Asphalt Overlay on Existing PCC". Proceedings of the Ninth International Conference on Asphalt Pavements. Copenhagen, Denmark.
