

CAPAS ANTI-REFLEJO DE FISURAS EN PAVIMENTOS

**LUZ STELLA BRAVO MOLINA
DIANA CAROLINA ORTEGA BOHÓRQUEZ
GABRIEL RICARDO TORRA CALDERÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2008

CAPAS ANTI-REFLEJO DE FISURAS EN PAVIMENTOS

**LUZ STELLA BRAVO MOLINA
DIANA CAROLINA ORTEGA BOHÓRQUEZ
GABRIEL RICARDO TORRA CALDERÓN**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR
EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN
INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2008

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento:

- A Eduardo A. Castañeda P., Ingeniero Civil y Director del Seminario de Investigación, profesor titular de la escuela de Ingeniería Civil, UIS, por darnos la oportunidad de trabajar con él en este proyecto, por su orientación precisa y su incondicional apoyo.

- A Jorge N. Prieto M., Ingeniero Civil, Doctor de la Universidad Politécnica de Madrid, España, profesor de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su colaboración, aportes y sus valiosas orientaciones.

- A Sergio A. Pérez R., Ingeniero Civil, Doctor de la Universidad de Limoges, Francia, Investigador del Centre de Recherches Routières de Belgique, por toda la colaboración prestada durante el desarrollo de este proyecto.

- A Nuestros familiares, amigos y compañeros, por su colaboración, apoyo y toda su paciencia.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. FISURAS EN PAVIMENTOS	4
1.1. GENERALIDADES.....	4
1.1.1. Definición de pavimento	4
1.1.2. Características de los pavimentos.....	5
1.1.3. Clasificación de los pavimentos	6
1.1.4. Estructura de los pavimentos	7
1.2. DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS FISURAS	8
1.2.1. Clasificación de fisuras en pavimentos flexibles según su origen	9
1.2.1.1. Fisuración por fatiga	9
1.2.1.2. Fisuración de origen térmico	14
1.2.1.3. Fisuración por inestabilidad de la banca	17
1.2.2. Fisuras en los pavimentos semi-rígidos	19
1.2.2.1. Fisuración por fatiga	20
1.2.2.2. Fisuración por inestabilidad de la banca	22
1.2.2.3. Fisuración por gradientes térmicos	23
1.2.2.4. Fisuración por retracción de fraguado	25
1.2.3. Análisis de severidad de las fisuras	26
2. PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS A LA CAPA DE RODADURA.....	30
2.1. FENÓMENO DE LA REFLEXIÓN	31

2.2.	MECANISMOS DE INDUCCIÓN DE LAS FISURAS DE REFLEXIÓN..	34
2.2.1.	Cambios de temperatura.....	37
2.2.2.	Cargas de tráfico	38
2.3.	MÉTODO ANALÍTICO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS	41
3.	TÉCNICAS Y SISTEMAS ANTIRREFLEXIÓN DE FISURAS	43
3.1.	PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE FISURAS ANTES DE COLOCAR LA CAPA DE SUPERFICIE	44
3.1.1.	Corte, sellado y llenado de fisuras (Crack Seals)	45
3.1.2.	Prefisuración para bases estabilizadas	49
3.1.3.	Lechadas (Slurry Seals)	53
3.2.	CONTROL DE LA PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS	54
3.2.1.	Capa de Nivelación.....	56
3.2.2.	Capa de Interposición.....	56
3.2.2.1.	Geotextiles.....	58
3.2.2.2.	Mallas	64
3.2.2.3.	Membranas absorbentes de tensión.....	69
3.2.2.4.	Intercapas Granulares	71
3.2.2.5.	Estructuras Inversas	72
3.2.3.	Capa de Rodamiento	74
3.2.3.1.	Mezclas asfálticas modificadas con betún con alto contenido de caucho	75
3.2.3.2.	Mezclas asfálticas modificadas con polímeros	77
4.	EXPERIMENTACIONES EN EL LABORATORIO	80

4.1.	PRUEBAS EN EL LABORATORIO	80
4.1.1.	Pruebas de fatiga por cizallamiento	81
4.1.1.1.	Prueba de cizallamiento DEFLT	81
4.1.1.2.	Cizallamiento RCD (Reflective Cracking Device)	82
4.1.1.3.	Máquina de prueba por cizallamiento	85
4.1.1.4.	Prueba de fatiga por cizallamiento del laboratorio 3MSGC de Egletons	87
4.1.2.	Pruebas de laboratorio para la simulación del comportamiento de la capa de superficie bajo cargamento repetido (tráfico y/o térmico).....	93
4.1.2.1.	Simulación del tráfico.....	93
4.1.2.1.1.	Prueba de viga en flexión con carga dinámica	93
4.1.2.1.2.	Prueba con paso real de una carga rodante	94
4.1.2.1.3.	Prueba del comportamiento del revestimiento en el caso de recarga de losas Vanelstraete	95
4.1.2.2.	Simulación de las variaciones térmicas.....	96
4.1.2.2.1.	Prueba de simulación de la retracción térmica	97
4.1.2.2.2.	Prueba de simulación de la retracción térmica “Fisurómetro E/G”	97
4.1.2.2.3.	Prueba para simular las fuerzas térmicas “dispositivo experimental de la prueba BRRC”	100
4.1.2.2.4.	Prueba para simular fuerzas térmicas “UPGRADED OVERLAY TESTER” del TTI (Instituto de transporte de Texas)	101
4.1.2.3.	Simulación de los efectos combinados de fuerzas térmicas y cargas de tráfico	107
4.1.2.3.1.	Prueba de retracción-flexión del LR de Autun	108

4.1.2.3.2.	Prueba ETS (Escuela de Tecnología Superior, Universidad de Quebec)	112
4.1.2.3.3.	Prueba SIFIRE (Simulación de la Fisura Reflexiva)	116
4.1.2.3.4.	Prueba WRC (Wheel Reflective Cracking)	122
4.1.2.3.5.	Banco de fatiga MEFISTO	130
4.2.	ENSAYOS DE LABORATORIO A ESCALA REAL	132
4.2.1.	Enfoque experimental y numérico de la fisura reflexiva de las calzadas	133
4.3.	PRUEBAS COMPLEMENTARIAS	143
4.3.1.	Pruebas de adherencia	143
4.3.1.1.	Tracción directa	143
4.3.1.2.	Prueba de extracción.....	144
4.3.1.3.	Pruebas de Cizallamiento	145
4.3.1.3.1.	Prueba de cizallamiento directo	145
5.	PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO DE UNA PRUEBA DE LABORATORIO QUE DETERMINE LA EFICIENCIA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ANTI-REFLEXIÓN DE FISURAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	149
5.1.	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	149
5.2.	ALCANCE.....	150
5.3.	METODOLOGÍA	150
5.3.1.	Caracterización de materiales	152
5.3.2.	Características de la prueba.....	156
5.3.3.	Sistema de carga	158

5.3.4.	Tipos de probetas.....	164
5.3.5.	Sistemas de medición	165
5.3.6.	Análisis de resultados.....	169
5.3.7.	Presupuesto	172
6.	CONCLUSIONES.....	180
7.	RECOMENDACIONES	182
	BIBLIOGRAFÍA.....	183

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Estructura de los pavimentos flexibles y rígidos	7
Figura 1.2. Representación de una fisura longitudinal	11
Figura 1.3. Representación de una fisura transversal.....	12
Figura 1.4. Fisura longitudinal y transversal generada por efecto de las juntas de construcción, respectivamente	13
Figura 1.5. Evolución de daños a fisuras en bloque	14
Figura 1.6. Fisura transversal al eje de la carretera.	15
Figura 1.7. Rangos de temperatura asociados a diferentes tipos de fisuración térmica.....	16
Figura 1.8. Representación de una fisura en medialuna y de una fisura de borde, respectivamente.....	19
Figura 1.9. Deterioro del pavimento formando una malla subdividida.....	21
Figura 1.10. Alabeos por cambios diarios de temperatura	24
Figura 1.11. Alabeos por cambios estacionales de humedad	24
Figura 1.12. Retracción de fraguado del concreto	26
Figura 2.1. Mecanismos de reflexión de fisuras en pavimentos semi-rígidos.....	32
Figura 2.2. Reflexión de fisuras en calzadas semi-rígidas	33
Figura 2.3. Representación de una fisura individual y de dos fisuras paralelas, respectivamente.....	33
Figura 2.4. Movimientos de los bordes de una fisura (Métodos I, II, III)	36
Figura 2.5. Combinaciones de movimientos posibles de los bordes de una fisura	36

Figura 2.6. Relación de la posición de los vehículos con la orientación de las fisuras	39
Figura 2.7. Solicitaciones experimentadas por la estructura del pavimento.....	40
Figura 3.1. Cortado y sellado de juntas en la capa de superficie	46
Figura 3.2. Procedimiento de sellado de fisuras	47
Figura 3.3. Sellado de fisuras	47
Tabla 3.1. Criterios de tratamiento según las características de la fisura	48
Figura 3.4. Exceso de sellado de fisuras	49
Figura 3.5. Esquema de las técnicas de prefisuración.....	50
Figura 3.6. Equipo para prefisuración CRAFT	51
Figura 3.7. Equipo para prefisuración junta activa	52
Figura 3.8. Equipo para prefisuración OLIVIA	52
Figura 3.9. Ejemplo de utilización de lechada asfáltica	53
Figura 3.10. Procedimiento de aplicación de lechada asfáltica	54
Figura 3.11. Representación de una estructura de pavimento	55
Figura 3.12. Uso de un sistema de interposición	58
Figura 3.13. Usos de los geotextiles	60
Figura 3.14. Sistema de interposición con geotextiles	61
Figura 3.15. Respuesta a la fatiga de la capa de repavimentación asfáltica	62
Figura 3.16. Representación del proceso de colocación del geotextil en sus primeras etapas	63
Figura 3.17. Representación del proceso de colocación del geotextil en su fase final.....	63
Figura 3.18. Esquema de las geomallas y geogrillas	65

Figura 3.19. Geomalla de refuerzo	66
Figura 3.21. Grilla de fibra de vidrio	67
Figura 3.23. Configuración del Sistema SAMI.....	69
Figura 3.24. Esquema de un sistema SAMI.....	70
Figura 3.25. Esquema de una intercapa granular	71
Figura 3.26. Estructura rehabilitada con refuerzo granular y estructura inversa, respectivamente.....	72
Figura 3.27. Estructura de un pavimento semi-rígido convencional (a) y uno inverso (b)	73
Figura 3.28. Proceso de rehabilitación de una vía urbana en Salamanca con mezcla asfáltica modificada con betún	76
Figura 3.29. Vía urbana en Salamanca después del procedimiento de reparación	76
Tabla 3.3. Cuadro resumen de pruebas realizadas a escala real	78
Figura 4.2. Representación diagramática de la prueba de RCD (Reflective Cracking Device)	83
Figura 4.3. Modelación idealizada del comportamiento de la fisura	84
Figura 4.4. (a), Descripción del armazón de soporte de la probeta (b), dimensiones de la probeta	86
Figura 4.5. Banco de fatiga por cizallamiento del laboratorio 3MSGC	87
Figura 4.6. Geometría de la Probeta C.S. modificada	88
Figura 4.7. Banco experimental y sistema de medida y de adquisición.....	90
Figura 4.8. Captador de fuerza	90
Figura 4.9. Captador de desplazamientos	90

Figura 4.10. Sonda térmica instalada sobre la cara posterior de la probeta (agrietada).....	91
Figura 4.11. Representación de la prueba de viga en flexión con carga dinámica (RIG93).....	94
Figura 4.12. Representación de la prueba con paso real de una carga rodante (BRO93)	95
Figura 4.13. Representación de la prueba del comportamiento del revestimiento en el caso de recarga de losas Vanelstraete	96
Figura 4.14. Esquema del sistema de ensayo que simula fuerzas térmicas.....	97
Figura 4.15. Esquema del “Fisurómetro E/G” y su probeta.....	98
Figura 4.16. Esquema de las primeras versiones de la prueba del TTI.....	102
Figura 4.17. Dispositivo experimental desarrollado en el TTI	103
Figura 4.18. Diagrama esquemático de los tipos del cargamento a) y b).....	104
Figura 4.19. Resultado típico del probador (cada ciclo de abertura y cierre es de 10s).....	106
Figura 4.20. Resultado Esquema del dispositivo del LR Autun.....	110
Figura 4.21. Resultados de pruebas de retracción-flexión para probetas reforzadas con la grilla Rotaflex.....	111
Figura 4.22. Esquema de la prueba por sollicitación térmica	113
Figura 4.23. Esquema de la prueba por sollicitación de tráfico	113
Figura 4.24. Esquema representativo de la probeta ETS	114
Figura 4.25. Fotos del dispositivo en condiciones reales	116
Figura 4.26. Banco de prueba SIFIRE de la ENPC	118
Figura 4.27. Dispositivo viga más gatos de aplicación del cargamento vertical ...	119

Figura 4.28. Dispositivo de tipo “brazo de palanca” de aplicación de la carga horizontal.....	120
Figura 4.29. Armazón de la prueba SIFIRE y probeta	121
Figura 4.30. Esquemas de la prueba WRC desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid.....	125
Figura 4.31. Esquemas del dispositivo usado para simular el movimiento vertical relativo de los bordes de la fisura junta	127
Figura 4.32. Ubicación de la goma que simula la deflexión de la probeta	128
Figura 4.33. Principio de funcionamiento del banco de fatiga Mefisto	131
Figura 4.34. Principio de funcionamiento de las máquinas FABAC.....	134
Figura 4.35. Tres tipos de estructuras ensayadas en la series de pruebas	136
Figura 4.36. Fisuras en las juntas N° 3 y N° 7 a las 654.000 repeticiones	138
Figura 4.37. Fisura en la juntas N° 6 a las 452.000 repeticiones	139
Figura 4.40. Esquema de la prueba de tracción directa	144
Figura 4.41. Esquema de la prueba de extracción	145
Figura 4.43. Prueba de cizallamiento directo.....	147
Figura 5.2. Vehículo rígido de dos ejes (C2G)	158
Figura 5.3. Vista lateral derecha del Actuador.....	160
Figura 5.4. Vista lateral izquierda del Actuador	160
Figura 5.5. Vista frontal-lateral del muro de empotramiento	162
Figura 5.6. Orificios para el empotramiento del marco metálico y de la placa metálica	162
Figura 5.7. Esquema de la máquina adaptada para la realización de los ensayos	163

Figura 5.8. Sistema de medición simple	166
Figura 5.9. Ubicación de los hilos conductores en la probeta a ensayar	166
Figura 5.10. Distribución en planta de los LVDTs	167
Figura 5.11. Detalle del montaje de los LVDTs	168

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.2. Funciones que desempeñan algunos materiales como sistema antirreflexión.....	57
Tabla 5.1. Metodología propuesta	152
Tabla 5.2. Características del ensayo de prueba	169
Tabla 5.3. Cuadro resumen de los resultados obtenidos	169
Tabla 5.4. Cuadro resumen para los resultados obtenidos de flexiones y cortantes	170
Tabla 5.5. Presupuesto de la metodología propuesta	179

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación (2.1) Ley Empírica de París.....	41
Ecuación (2.2) Relación empírica para el cálculo del parámetro A	42
Ecuación (5.1) Valor depreciable por hora del equipo	176
Ecuación (5.2) Factor C.....	176
Ecuación (5.3) Costo Operario.....	177
Ecuación (5.4) Costo de filtros, tanqueo y lubricación	177
Ecuación (5.5) Costo de reparaciones.....	178

RESUMEN

TÍTULO: CAPAS ANTI-REFLEJO DE FISURAS EN PAVIMENTOS.*

AUTORES: LUZ STELLA BRAVO MOLINA.
DIANA CAROLINA ORTEGA BOHÓRQUEZ.
GABRIEL RICARDO TORRA CALDERÓN.**

PALABRAS CLAVE: Fenómeno de la reflexión de fisuras, Pavimentos, Ensayos, Sistemas antirreflexión, Pruebas, Investigaciones, Cargas de tráfico.

DESCRIPCIÓN: Con el objetivo de establecer un marco teórico que permitiera contextualizar el estudio de la reflexión de fisuras en capas bituminosas a las características propias de nuestro país, éste documento comienza con la revisión bibliográfica de las investigaciones publicadas acerca del tema, lo cual permitió establecer el estado del arte enfocados en el estudio sobre el origen de las fisuras, las causas de la reflexión, técnicas antirreflexión de fisuras y ensayos de laboratorio y campo desarrollados para analizar el fenómeno.

La formulación de un trabajo de investigación involucra un proceso de laboratorio que permita evaluar distintos métodos antirreflexión de fisuras, teniendo en cuenta los factores que se hacen definitivos para el ensayo. Este trabajo de investigación consta, en su eje principal de una metodología propuesta para el desarrollo de una prueba de laboratorio que mida la resistencia de un pavimento a la reflexión de fisuras. La metodología define aspectos como la caracterización de materiales, características de la prueba, sistema de carga, tipo de probetas, sistemas de medición y análisis de resultados, permitiendo realizar diferentes clasificaciones de los resultados de manera que se pueda obtener una idea más clara sobre la eficiencia de cada sistema ensayado.

Finalmente se presenta una estimación detallada del costo total de la ejecución de la investigación teniendo en cuenta todos los equipos, materiales y personal necesarios para la correcta consecución de la prueba.

* Seminario de Investigación.

** Facultad de Ciencias Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

SUMMARY

TITLE: FISSURE ANTIREFLECTION SYSTEMS IN PAVEMENTS.*

AUTHORS: LUZ STELLA BRAVO MOLINA.
DIANA CAROLINA ORTEGA BOHÓRQUEZ.**
GABRIEL RICARDO TORRA CALDERÓN.

KEY WORDS: Phenomenon of the fissures reflection, Pavements, Tests, Antireflection systems, Tests, Investigations, Traffic loads.

DESCRIPTION: Aiming to establish a theoretical background that allowed to contextualize the study of the fissures reflection in bituminous layers to our country own characteristics, this document begins with the bibliographical revision of the investigations published about this subject, which allowed to establish the state-of-the-art focused on the studies about the fissures origin, the causes of the reflection, antireflection of fissures techniques, field and laboratory tests developed to analyze the phenomenon.

The formulation of an investigation work involves a laboratory process which allows evaluating different antireflection of fissures methods, considering the factors that become definitive for the test. This investigation work consists, in its main axis, of a proposed methodology for the development of a laboratory test that measures the resistance of a pavement to the reflection of fissures. The methodology defines aspects like the characterization of materials, characteristics of the test, load system, type of test tubes, measurement systems, and analysis of results, allowing to stipulate different classifications forms from the results. All these previous aspects help obtain a clearer idea of the efficiency of each tried system..

Finally a detailed estimate of the total cost of the execution of the investigation appears, considering all the necessary equipment, materials, and personnel for the correct attainment of the test.

* Seminary of Investigation.

** Faculty of Physicomechanical Sciences. School of Civil Engineering. Director Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

INTRODUCCIÓN

Indudablemente un correcto y periódico mantenimiento y reparación de vías existentes, prolongará de manera efectiva la vida útil de éstas, mejorando simultáneamente el nivel de servicio y la comodidad ofrecida. La reflexión de fisuras es un fenómeno que alrededor del mundo ha estado causando rápidos deterioros de pavimentos nuevos, incluso cuando se tienen estudios precisos de la forma en que se genera. Dada ésta situación, Colombia no ha presentado suficientes investigaciones que permitan adecuar técnicas, o simplemente usar de manera efectiva sistemas que frenen el proceso de degradación, a pesar de tener empresas que poseen en su portafolio de productos, elementos que pueden llegar a incidir de manera positiva.

El fisuramiento de los pavimentos flexibles tiene su origen en diversos factores como la fisuración por fatiga, fisuración de origen térmico, fisuración por inestabilidad de la banca y en el caso específico de los pavimentos semi-rígidos, que poseen bases estabilizadas con cemento, se presenta la fisuración por retracción de fraguado, desarrollando principalmente fisuras longitudinales y transversales.

El fenómeno de la reflexión de fisuras es un proceso cuyas causas están directamente relacionadas con las cargas de tráfico, las variaciones térmicas y el contenido de agua en el suelo, el cual se desarrolla en tres fases: iniciación, propagación y ruptura de la capa de rodadura; estas causas generar tres tipos de movimientos en los bordes de la fisura que aumentan los esfuerzos de tensión en la capa base provocando la reflexión de la fisura en la capa de refuerzo.

Esta investigación pretende dar una noción más práctica del tratamiento necesario para retrasar los efectos, analizando el comportamiento de distintos sistemas

antirreflexión de fisuras. Para conseguirlo se comienza con la evaluación del estado del conocimiento del tema mediante una revisión bibliográfica para lograr un avance significativo en el marco teórico de manera que se pueda enfocar el estudio hacia una propuesta investigativa centrada en el contexto correcto.

La formulación del trabajo investigativo que surge en éste documento intenta reunir todos los aspectos que deben ser evaluados para lograr una simulación veraz, tales como cargas, efectos de la subrasante, espesores, tipos de mezclas, entre otros, de manera que no sólo se obtengan resultados confiables sino que sean aplicables en el país. Además pretende señalar el problema como un factor importante a la hora de plantear el mejoramiento de una vía, de forma que la degradación no se presente de manera inesperada.

PARTE I
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. FISURAS EN PAVIMENTOS

Las estructuras de pavimentos que constituyen el país se ven diariamente perjudicadas tanto por las acciones naturales del medio ambiente como también por los fenómenos causados ante el paso repetitivo del tránsito vehicular; un adecuado análisis de dichos factores puede conllevar al diseño de mejores estructuras de pavimento previniendo y retardando los daños en la capa de rodadura y de esta manera aumentar su vida útil.

1.1. GENERALIDADES

Los pavimentos constan de características y estructuras diferentes con el fin de brindar mayor comodidad y seguridad al usuario. Los diferentes tipos de pavimentos han surgido de la necesidad de obtener economía en la construcción, garantizando su correcto funcionamiento.

1.1.1. Definición de pavimento

El pavimento está constituido por un conjunto de capas de materiales que han sido previamente seleccionadas para recibir en forma directa las cargas del tránsito y transmitir las a los estratos inferiores distribuyéndolas con uniformidad, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe dar comodidad, economía y seguridad a los usuarios, durante el período para el cual fue diseñada la estructura del pavimento.

1.1.2. Características de los pavimentos

Los pavimentos deben cumplir con dos características fundamentales para garantizar su buen funcionamiento:

A. Estructurales: Tienen en cuenta los materiales usados en las diferentes capas con sus espesores. El pavimento debe:

- Repartir uniformemente las cargas bajo las ruedas de los vehículos sobre espacios o áreas extensas con el fin de evitar fallas y agrietamientos.
- Ser resistente ante las condiciones de intemperismo.
- Tener una adherencia adecuada entre el pavimento y los vehículos.
- Ser económico y durable.

B. Funcionales: Corresponden prácticamente a las de la superficie del pavimento y que afectan directamente a los usuarios. Estas son:

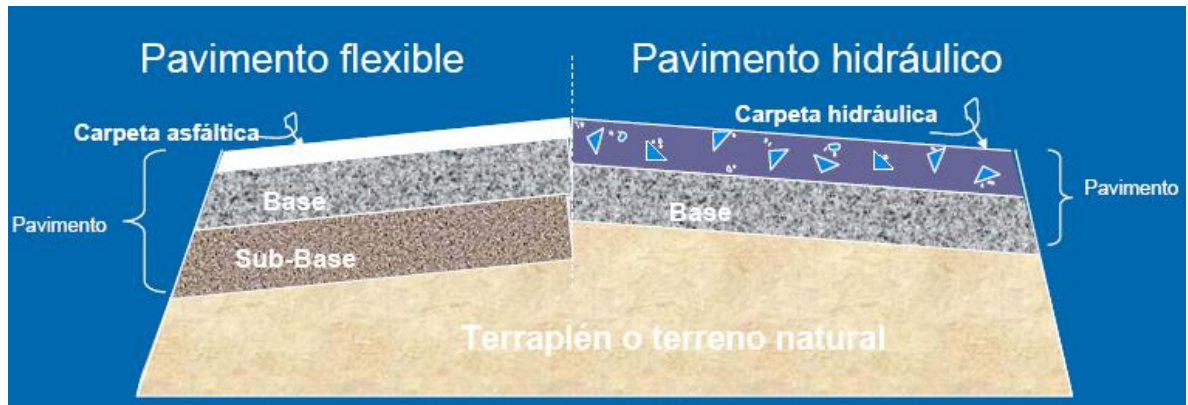
- Buena regularidad superficial, tanto transversal como longitudinal, que permitan comodidad a los usuarios en cuanto se refiere a las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.
- Reducido ruido de rodadura que influye en el entorno de los usuarios.
- Propiedades de reflexión luminosa y color adecuados que ofrezcan seguridad al tránsito.
- Desagüe superficial rápido para evitar el hidropneumático.

1.1.3. Clasificación de los pavimentos

Los pavimentos se clasifican en:

- A. Flexibles: Consisten en una carpeta bituminosa, que contiene arena y grava mezcladas con alquitrán, betún asfáltico, etc., construida generalmente sobre dos capas no rígidas, la base granular y la subbase granular, y éstos a su vez descansan sobre un material natural compactado o sobre una capa denominada subrasante. Dependiendo de las especificaciones de las obras, algunas veces puede prescindirse de cualquiera de estas capas.
- B. Semi-rígidos: Están formados básicamente con la misma estructura de un pavimento flexible, pero poseen una capa rigidizada con aditivos como asfalto, cemento, cal y químicos, o con un espesor considerable (15cm o más) de mezclas bituminosas. Este tipo de pavimento es usado para carreteras de medio o alto tráfico.
- C. Rígidos: Cuentan con una losa de concreto hidráulico que trabaja como superficie de rodamiento, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa de material seleccionado (subbase) y pueden o no tener base granular entre el pavimento y el terreno de apoyo.
- D. Articulado: La capa de rodadura está compuesta por bloques de concreto, es decir, por adoquines pre-moldeados de hormigón vibrado y comprimido, de espesor uniforme y de un tamaño tal que permiten su manipulación y colocación en forma práctica y sencilla. Esta capa se asienta sobre un manto de arena la cual, a su vez, se apoya sobre una base granular o directamente sobre terreno natural.

Figura 1.1. Estructura de los pavimentos flexibles y rígidos



Fuente: José Osiris Vidaña Bencomo; Deterioro en pavimentos flexibles de ciudad Juárez por efectos del agua pluvial.

La diferencia principal entre los pavimentos flexibles y rígidos es la manera en que distribuyen las cargas al terreno de apoyo o terreno natural. El pavimento rígido debido a la alta rigidez del concreto hidráulico y a su alto modulo de elasticidad distribuye los esfuerzos sobre una zona muy amplia, por lo que la mayoría de su capacidad estructural se encuentra en la losa.

1.1.4. Estructura de los pavimentos

Los pavimentos están conformados por capas de diferentes materiales y espesores, las más utilizadas junto con sus funciones son:

- A. Capa de rodadura: Es la parte superior del pavimento y su función es soportar los esfuerzos tangenciales del tránsito. La superficie debe ser uniforme y estable, y con adecuada textura y color. Para los pavimentos rígidos, las losas de concreto deben cumplir con las mismas funciones de la capa de rodadura de los pavimentos flexibles.
- B. Base: Su función principal es absorber y transmitir a la subbase y a la subrasante, la mayor parte de los esfuerzos verticales que se generan por el

paso de los vehículos. Para tráficos medios y ligeros se utilizan bases granulares y para tráficos pesados se emplean materiales tratados con un ligante o conglomerante.

- C. Subbase: Proporciona a la base un cimiento uniforme y debe soportar los esfuerzos transmitidos desde las capas superiores. Además debe drenar el agua que se introduzca a través de la capa de rodadura, al igual que evitar la ascensión capilar. En pavimentos rígidos, debe impedir la acción de bombeo en las juntas, fisuras y extremos del pavimento.
- D. Subrasante: Es la capa que finalmente debe resistir todas las cargas que corren sobre el pavimento. Algunas veces, esta capa está conformada solo por la superficie del terreno.

1.2. DESCRIPCIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS FISURAS

Factores como las elevadas cargas de tránsito, la calidad deficiente de los materiales, los malos diseños, la retracción térmica, procesos constructivos equivocados, entre otros, generan daños, deformaciones y variaciones en la estructura de los pavimentos, tanto flexibles como semi-rígidos y rígidos, los cuales se verán reflejados directamente en un servicio vial de muy baja calidad, afectando la seguridad, comodidad y velocidad de los vehículos a mediano y largo plazo. Por tal motivo la función principal de todo proceso de mantenimiento es reparar y solucionar los daños y las fallas para garantizar la correcta funcionalidad de los pavimentos durante el tiempo para el cual han sido diseñados.

La comprensión de los fenómenos de los daños en los pavimentos y la búsqueda de soluciones en este ámbito ha sido objeto de un gran número de trabajos y de investigaciones, que se han desarrollado en los últimos años, dada la importancia del mantenimiento de las redes viales.

Existen varias clases de fallas en los pavimentos pero se hablará específicamente de las causas que originan fisuras en la carpeta asfáltica y que a su vez contribuyen a la aceleración del fenómeno de la fisura reflexiva cuando se hace un mantenimiento en una vía con una capa de refuerzo; para el propósito de este estudio sólo se trabajarán las estructuras de pavimentos clasificadas como flexibles, es decir, los flexibles y los semi-rígidos, en los cuales se evidencia frecuentemente dicho fenómeno.

1.2.1. Clasificación de fisuras en pavimentos flexibles según su origen

Uno de los grandes problemas de deterioro de los pavimentos flexibles son las fisuras que aparecen en la capa de rodadura del mismo, generando un alto costo en la labor de mantenimiento de dichos pavimentos. Aunque existen diferentes variables de daño en los pavimentos flexibles, se hará énfasis en las fisuras sobre la capa de rodadura, las cuales al pasar por una serie de procesos se convierten en fisuras reflexivas, haciendo que el diseño de una capa de refuerzo sea más dispendioso a la hora de retardar la aparición de dichas fisuras.

1.2.1.1. Fisuración por fatiga

En la vida útil de un pavimento se pueden ocasionar dos tipos de fallas, estructural y funcional. La falla funcional se da cuando la vía pierde la capacidad de transportar cómodamente a los vehículos de tal manera que llega a perder incluso seguridad. La falla estructural se relaciona con la pérdida de cohesión entre dos o más capas del pavimento, generando pérdidas importantes de resistencia a tal punto que la estructura deja de soportar las cargas a las que está sometida. Las dos fallas pueden o no darse simultáneamente.

La fatiga es un indicador de una falla estructural, debido a que está relacionada con la deformación de las capas del pavimento y las repeticiones de carga aplicadas sobre ellas, haciéndolas perder capacidad estructural de tal manera que

se crean fisuras sobre la carpeta. Por medio de ensayos de fatiga realizados en laboratorio se ha determinado que estas fisuras se generan inicialmente en la base de la capa, para luego de unas semanas o incluso años, extenderse y llegar hasta la superficie de la misma.

Un ejemplo para explicar en síntesis lo que es la fatiga sería tomar un alambre y empezar a doblarlo siempre de la misma manera y con el mismo esfuerzo, se observará que en alguna repetición el alambre se romperá. Esto es exactamente lo que ocurre con el pavimento, después de una acumulación de repeticiones de carga causadas por el tráfico de vehículos, el pavimento desarrolla pérdidas importantes de resistencia y cede ante el esfuerzo generado en sus capas inferiores.

Dada la definición de fatiga se pueden determinar tres características esenciales para el desarrollo del fenómeno: la intensidad de la carga, la magnitud de la deformación generada y la rigidez de la carpeta. Como bien se sabe, exactamente en el momento siguiente a la aplicación de la carga, el material deformado intenta recobrar su estado inicial pero no lo logra a cabalidad, situación que da lugar a un posterior ahuellamiento o fisuramiento de la carpeta, generando así lo que se conoce como fatiga en el material.

En los pavimentos flexibles se pueden presentar varios agentes acelerantes del proceso de fatiga, entre los más significativos se encuentran:

A. Envejecimiento de la carpeta asfáltica: El “endurecimiento por envejecimiento” o también llamado “endurecimiento por oxidación” de la capa bituminosa, se genera cuando logra entrar oxígeno a los intersticios del pavimento, el cual contiene moléculas orgánicas en los betunes; el oxígeno crea una reacción en el pavimento que conlleva al cambio de su composición y de su estructura, provocando variaciones en las propiedades de la carpeta como la dureza y

fragilidad. Debido a este fenómeno la carpeta queda más susceptible a la acción del tránsito, favoreciendo el desarrollo de fisuras longitudinales evidenciadas en las zonas de mayor tráfico.

Figura 1.2. Representación de una fisura longitudinal



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

B. Defectos constructivos: Existen diferentes tipos de defectos constructivos que pueden contribuir al proceso de fatiga, entre los que se encuentran:

- La deficiencia de espesores de la capa asfáltica que genera una falla en el sistema estructural, disminuyendo considerablemente la capacidad de carga.
- La mala compactación y el subdrenaje inadecuado de las capas que permite la entrada de agua a las mismas, provocando el movimiento y arrastre de las partículas más finas, dando paso a la formación de cavidades y por

consiguiente dejando la capa asfáltica sin apoyo suficiente para soportar las cargas de tránsito y transmitir las a las demás capas.

- El defecto en las juntas por falta de ligante que crea una discontinuidad sobre el pavimento que impide la correcta transferencia de cargas.
- La ausencia de bermas que produce un defecto estructural debido a la falta de confinamiento lateral.
-
- Todos estos defectos conllevan principalmente a la aparición de fisuras longitudinales sobre la calzada, aunque también se pueden presentar fisuras transversales.

Figura 1.3. Representación de una fisura transversal



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

Las fisuras generadas por fatiga se inician principalmente en la base de la capa asfáltica, por las causas ya descritas, y se van propagando a través de los espesores hasta llegar a la superficie, en donde quedan expuestas a la acción

directa del tráfico, causándole un deterioro más rápido a la superficie de rodadura. Por otra parte, también se pueden presentar fisuras transversales como indicador de fatiga tales como las que se generan por efecto de las juntas de construcción o por el envejecimiento de la carpeta asfáltica, estas fisuras al no ser tratadas a tiempo pueden causar daños aún más severos como por ejemplo la fisuración en bloque del pavimento. El movimiento de estas fisuras depende de la acción del tráfico, fenómeno que será objeto de estudio en el Capítulo II.

Figura 1.4. Fisura longitudinal y transversal generada por efecto de las juntas de construcción, respectivamente



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

Figura 1.5. Evolución de daños a fisuras en bloque



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

1.2.1.2. *Fisuración de origen térmico*

Las variaciones de origen térmico en la superficie de un pavimento inducidas por la temperatura ambiente, pueden provocar por sí solas unas tensiones de tracción que desarrollan fisuras en dicha superficie, evolucionando desde arriba hacia abajo¹.

Esta fisuración se puede presentar de dos maneras, la primera es la retracción térmica, la cual ocurre en climas muy fríos, donde el enfriamiento progresivo de la capa bituminosa provoca una contracción del material. Esta capa se encuentra restringida por su adherencia con las capas inferiores, razón por la cual produce tensiones de tracción horizontal en la superficie. Si al presentarse un descenso considerable en las temperaturas y las tensiones inducidas superan la resistencia

¹ Pérez y Del Val Melús; La Fisuración Térmica De Los Pavimentos De Mezcla Bituminosa, 1994.

del material a esa temperatura, se puede generar una serie de micro-fisuras en la superficie que van evolucionando de arriba hacia abajo.

Las fisuras que se presentan en un pavimento flexible por esta causa, son generalmente fisuras transversales al eje de la carretera, que inicialmente se muestran con un espaciamiento uniforme de unos 100 m, pero que pueden llegar a tener 1 m de espaciamiento, debido al envejecimiento de la mezcla bituminosa. Pueden también aparecer fisuras longitudinales, si este espaciamiento llega a ser menor que el ancho de vía pavimentada.

Figura 1.6. Fisura transversal al eje de la carretera.

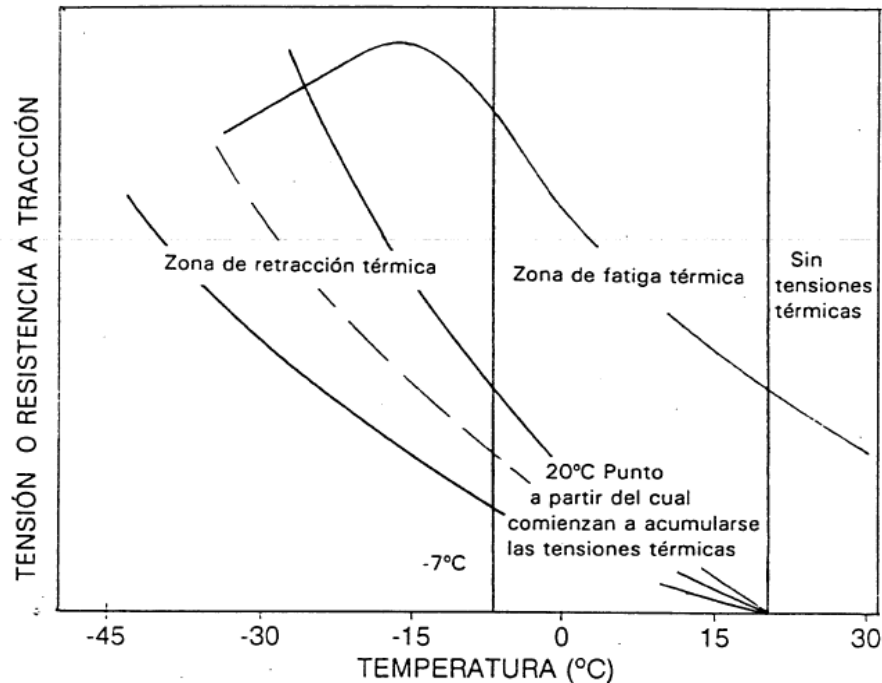


Fuente: Jorge Coronado I; Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras – Tomo III.

El segundo modo de fisuración térmica es la fatiga térmica, la cual se produce en zonas en donde las temperaturas no son tan extremas, pero si tienen un ciclo de variación térmica diaria, estos ciclos inducen tensiones de tracción en la superficie muy inferiores a la resistencia del material, y por ende pueden provocar el deterioro del pavimento por fatiga, de manera similar a la que ocurre con las tensiones debidas al tráfico. Las tensiones producidas por estos ciclos térmicos son notablemente superiores a las originadas por el tránsito de vehículos.

Aunque no se conocen muchos estudios sobre el tema, algunos investigadores han propuesto unos rangos de temperaturas que determinan los diferentes tipos de fisuración térmica; éstos aseguran que solo a temperaturas por debajo de los 20°C se empiezan a acumular tensiones de tracción debidas a un descenso de la temperatura de la mezcla. Cuando la temperatura de la mezcla se encuentra en el rango de los 20°C a los 7°C aproximadamente, las resistencias a tracción de la mezcla son muy superiores a las tensiones inducidas, dando como resultado el predominio de la fatiga térmica; del mismo modo se indica que sólo a temperaturas por debajo de los 7°C se empieza a presentar el fenómeno de la retracción térmica.

Figura 1.7. Rangos de temperatura asociados a diferentes tipos de fisuración térmica



Fuente: Vinson, T.S., Jackson, N.M. And Jung, D.H.; Thermal Cracking Resistance Of Asphalt Concrete : An Experimental Approach.

Cuando por efecto de la retracción térmica se generan fisuras transversales y longitudinales, se pueden presentar adicionalmente fisuras en bloque, dejando entrever que el asfalto se ha endurecido o envejecido significativamente, disminuyendo notablemente su capacidad de soportar las cargas de tránsito.

1.2.1.3. Fisuración por inestabilidad de la banca

Para intentar explicar en esencia lo que es la inestabilidad de la banca se deben tener varios conceptos claros que pueden ocurrir en la vía como falla del talud, deficiencia en muros de contención, consolidación de los rellenos y desecación del talud.

La falla del talud se evidencia cuando se presentan desprendimientos de granos, condición inicial para el movimiento del talud. El agua que se filtra en la masa de tierra es un iniciador importante de movimientos, generando presiones de poro que empujan la tierra creando daños en la carpeta. Igualmente los sismos, la altura e inclinación del talud y la meteorización, son factores importantes a tener en cuenta cuando se quiera revisar el motivo por el cual se inició la falla.

Muchas veces para poder prevenir el movimiento del talud se usan muros de contención que detienen la masa en movimiento. El problema de estos muros es que determinar la verdadera magnitud de la masa es complicado, al igual que saber la profundidad a la cual deben ir anclados. Se debe tener en cuenta que se debe dejar un drenaje apropiado al igual que una determinación correcta tanto del tipo de muro a utilizar como de los asentamientos, del análisis de estabilidad y el diseño estructural de los elementos.

Un proyecto importante necesita de buenos análisis de consolidación y algunas veces de una pre-consolidación de los rellenos, ya que si este fenómeno es menospreciado puede terminar generando el colapso de la estructura o el

deterioro del pavimento. La consolidación es un proceso natural mediante el cual las partículas de tierra se reorganizan creando una masa más densa gracias a la acción de las cargas que soporta, pudiendo ser este movimiento unidimensional o bidimensional. Se da en suelos finos cohesivos y suele tardar mucho tiempo, aunque puede variar, según el tipo de suelo y la magnitud de la carga, entre meses y años. El peso de las capas colocadas es el principal responsable de este fenómeno, sin embargo la acción del tránsito influye en buena parte.

A pesar de que el agua en los taludes puede generar efectos negativos, es necesario mantenerlo húmedo. El problema llega cuando se filtra agua en exceso a tal punto que llena todos los poros de la masa, iniciando un posible flujo de tierra. La desecación es el proceso contrario, mediante la acción de árboles o vegetación cerca al talud, el agua va desapareciendo dejando la masa de tierra sin presiones que mantengan sus partículas unidas, provocando así desprendimientos de granos y pérdida de resistencia. El factor térmico juega también un papel importante, ya que en temporadas de sequías el agua que pudiese contener el suelo se evapora.

Estos eventos generan un movimiento del suelo de apoyo que conlleva a una pérdida de la fuerza de sustentación del suelo. Esta situación desarrolla fisuras en medialuna o arco, longitudinales y transversales que generalmente son amplias, espaciadas y pueden localizarse en cualquier parte, tanto en el eje de la vía como en los bordes o incluso sobre las bermas. De igual manera toda la estructura deberá presentar la fisura y se podrá identificar un desnivel entre los costados de la misma. Si se quiere dar un buen tratamiento a las fisuras debido a la inestabilidad de la banca, se deben hacer estudios pertinentes que recopilen la información ya mencionada para poder determinar el mejor método a seguir.

Figura 1.8. Representación de una fisura en medialuna y de una fisura de borde, respectivamente



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

1.2.2. Fisuras en los pavimentos semi-rígidos

Como se puede observar la utilización de pavimentos semi-rígidos en el país ha ido creciendo en los últimos tiempos lo cual ha conllevado a todas las instituciones a realizar cada día más ensayos e investigaciones que permitan mejorar las ventajas que éstos pueden ofrecer; a su vez ha sido necesario indagar en las desventajas que poseen con el fin de optimizar sus diseños y sus mantenimientos. Por lo tanto es necesario reunir criterios que permitan la identificación y recolección de información relacionada con el daño y deterioro de los pavimentos semi-rígidos con el fin de que puedan dar una orientación más detallada en la reparación vial. A continuación se expondrán las definiciones y las causas posibles de las fallas más frecuentes e importantes que sufren estos tipos de pavimentos, las cuales poco a poco van ocasionando el deterioro progresivo de la estructura.

1.2.2.1. *Fisuración por fatiga*

Brown y Brunton (1984) han definido el término fatiga como “falla en el pavimento como resultado de aplicaciones repetidas de deformación bajo el nivel, el cual causa ruptura en una aplicación simple”. El agrietamiento por fatiga resulta de deformaciones repetidas generadas por esfuerzos de tensión y compresión, producidos por la acción del tránsito pesado, que en conjunto con la ondulación que se presenta debido a los cambios de temperatura, producen daños en la superficie de rodadura. Las fisuras se presentan inicialmente en el fondo de la capa, pero al poco tiempo se propagan hacia arriba causando pérdida de módulo de resiliencia, conllevando al cambio en la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura total del pavimento. Según el Instituto Mexicano de Transportes, la causa de falla por fatiga está relacionada con las características resilientes de cada componente del pavimento.

El proceso de deterioro comienza con los rompimientos discontinuos de forma longitudinal en las huellas de las llantas del tránsito, el paso continuo vehicular aumenta las roturas y se llega a un punto en el cual se unen formando una malla subdividida (piel de cocodrilo). Paralelamente se pueden presentar deformaciones cuando parte de las capas son desalojadas por el tránsito. Estos fisuramientos pueden significar el daño natural del pavimento, una vez se haya completado su período de diseño, pero en el caso que se den en un tiempo mucho antes de lo esperado, se considera que las cargas de tránsito fueron subestimadas, en pocas palabras se podría decir, que lo que se tienen son diseños inadecuados.

Figura 1.9. Deterioro del pavimento formando una malla subdividida



Fuente: Universidad Nacional de Colombia; Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles.

Existen dos factores importantes, que en combinación con el tráfico, pueden contribuir al agrietamiento por fatiga del pavimento, ellos son:

- A. Deficiente apoyo: La estructura del pavimento tiende a sufrir esfuerzos de fricción, cuando éste está sujeto a una disminución de la temperatura, motivo por el cual se generan movimientos que alteran su estabilidad. Las capas de apoyo, específicamente la base estabilizada, deben restringir este movimiento pues de lo contrario, el pavimento tendrá un apoyo deficiente y a raíz de ello, en la superficie de rodadura, comenzarán a surgir agrietamientos tanto transversales como longitudinales.
- B. Defectos constructivos: Al igual que en los pavimentos flexibles, se pueden presentar cambios en las especificaciones de los pavimentos al momento de

realizar su construcción. Los espesores inadecuados de las capas, pueden afectar directamente a la estructura a través de esfuerzos de alabeos y deflexiones; la falta de un adecuado sistema de drenaje conlleva a que el agua se acumule y se deposite dañando poco a poco la estructura del pavimento ocasionando inestabilidad.

Las fisuras que se desarrollan en un pavimento semi-rígido como indicadores de fatiga, son en su gran mayoría longitudinales pero también se encuentran fisuras transversales, con espaciamentos de 5 a 20 metros, producidas por la combinación de los factores anteriormente descritos. Estos efectos en conjunto con asentamientos que se presentan en la base y en la subrasante, producen que las fisuras formadas inicialmente aumenten de tamaño hasta interconectarse causando daños aún más graves como lo son las fisuras en bloque o en piel de cocodrilo.

1.2.2.2. Fisuración por inestabilidad de la banca

En la estructura de los pavimentos semi-rígidos, se cuenta con una base estabilizada, la cual posee una gran rigidez que permite sólo transmitir esfuerzos verticales al apoyo. Se pueden presentar inestabilidades cuando estas capas son sometidas a fuerzas de tracción-flexión lo suficientemente perjudiciales como para aumentar la capacidad de deformación en la base. La constante repetición de estos esfuerzos conlleva a la aparición de fisuras longitudinales en toda la superficie de la carpeta asfáltica de tal forma que si no se detienen a tiempo pueden llegar a ramificarse cuarteando la totalidad de la capa de rodamiento.

Laveissiere (2002) sustenta que este tipo de fisuras pueden afectar a todas las estructuras y su mecanismo sería el mismo en cualquier tipo de pavimento. La causa principal de este proceso es la pérdida de fuerza de sustentación del suelo

que conduce a rupturas en la base desarrollando fisuras simples longitudinales y transversales.

1.2.2.3. Fisuración por gradientes térmicos

Es muy importante tener en cuenta las variaciones en la temperatura y en la humedad que ocurren tanto en la carpeta asfáltica como en la base estabilizada, pues éstas son unas de las razones principales por las cuales se inducen movimientos en el pavimento dando como resultados concentraciones de esfuerzos y alabeos térmicos.

Los gradientes de temperatura y de humedad que ocurren en el interior del pavimento, generalmente después del fraguado del concreto, provocan esfuerzos que favorecen el agrietamiento de la superficie e inducen contracciones diferenciales, traducidos en alabeos, cuando los lados opuestos de una capa posee condiciones ambientales diferentes.

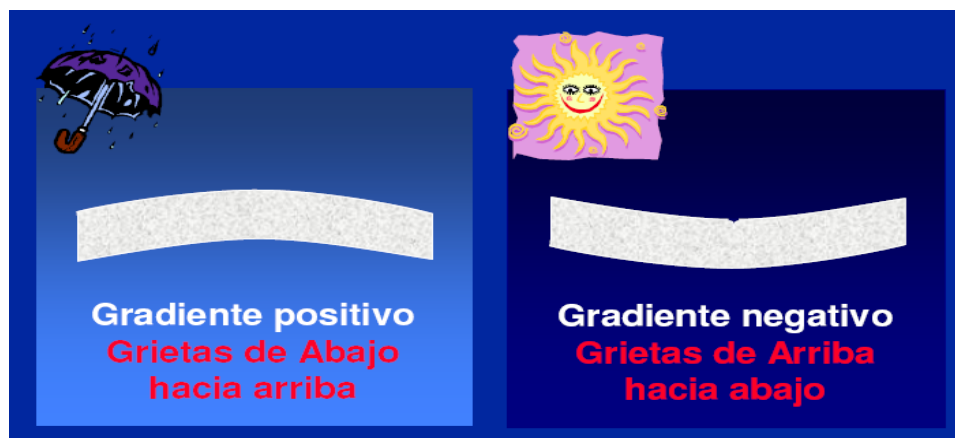
Las variables ambientales incluyen la temperatura, el clima y la hora del día. El alabeo es la curvatura que se presenta hacia arriba o hacia abajo de una capa; en el día, por la exposición de la capa al sol, se presenta un aumento de temperatura en la parte superior provocando una expansión mayor que la que sufre en su parte inferior conllevando al pandeo de la misma. Es en este momento en donde empieza a actuar el peso propio de la capa tratando de oponerse a dicho pandeo, ésta resistencia desarrolla esfuerzos de tensión en dirección al fondo de la estructura y esfuerzos de compresión hacia la parte superior. De noche el patrón de esfuerzos se presenta de manera inversa, es decir que se presentan esfuerzos de tensión hacia la parte superior de la capa y esfuerzos de compresión hacia el fondo del pavimento.

El efecto contrario a los alabeos por temperatura, son los alabeos por variaciones de humedad. En este caso el diferencial de humedad desde la parte superior de la capa hasta el fondo, es la que genera la curvatura y provoca esfuerzos de compresión en la base de la estructura que contrarrestan los esfuerzos de tensión por gradientes térmicos; la situación se da debido a que la superficie de la capa se encuentra más seca que el fondo. Se entiende entonces, que una disminución en el contenido de humedad provoca una contracción, mientras que un incremento provoca una expansión.

Figura 1.10. Alabeos por cambios diarios de temperatura



Figura 1.11. Alabeos por cambios estacionales de humedad



Fuente: Juan Pablo Covarrubias; Disminución del alabeo en pavimentos urbanos y pisos industriales de hormigón.

Estos mecanismos de variaciones térmicas en conjunto con las cargas de tráfico, conllevan al agrietamiento transversal, y en el caso de pavimentos con dos carriles de circulación, se tendrán también fisuras longitudinales a lo largo de la línea central del pavimento.

La cara superior del pavimento sufre diariamente y anualmente grandes variaciones de temperatura y contenido de humedad que se traducen en esfuerzos a su interior que pueden contribuir al agrietamiento. Para el caso de bases estabilizadas con cemento, este efecto se conoce como retracción de fraguado, el cual se expondrá detalladamente a continuación.

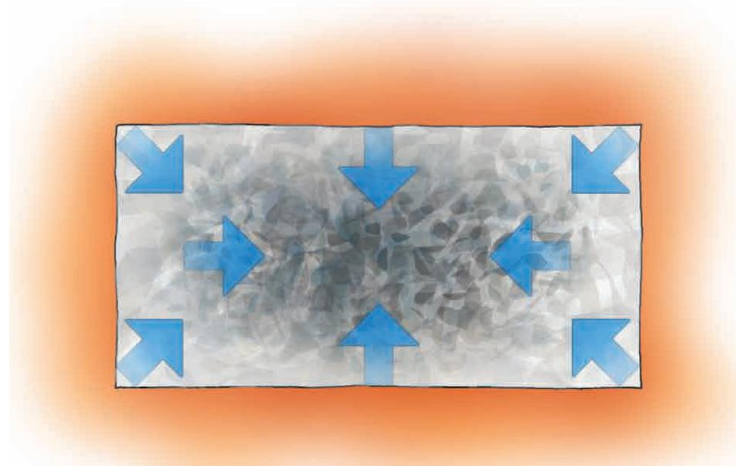
1.2.2.4. Fisuración por retracción de fraguado

La contracción por secado del concreto ocurre a muy temprana edad como consecuencia de cambios de temperatura durante los procesos de hidratación y fraguado; las deformaciones que se presentan por la retracción del concreto son dependientes del tiempo y no son provocadas por cargas. La superficie expuesta del concreto debe adaptarse al medio ambiente en que se encuentra pues éste influirá directamente en los cambios de volumen de la mezcla, así por ejemplo, si el ambiente es seco, se presenta la pérdida de agua por evaporación y si por el contrario es un ambiente húmedo, se tendrá una expansión en el concreto por el constante flujo de humedad.

Las prácticas de construcción como son la colocación, la compactación y el curado de concreto, son factores importantes para minimizar la magnitud de la retracción. El curado es un proceso que se debe realizar cuando la mezcla ha empezado a perder su brillo superficial y consiste en curar al concreto con una membrana a base de agua mediante aspersores manuales, aplicado de manera uniforme. Si se tiene un apropiado curado, inmediatamente después del acabado del concreto, se

evitará la pérdida del agua impidiendo el secado de la superficie, especialmente en lugares con climas cálidos.

Figura 1.12. Retracción de fraguado del concreto



Fuente: Imcyc; Contracción por secado del concreto.

Se puede considerar que la retracción de fraguado no es un problema cuando el concreto está libre para moverse, pero lo que sucede realmente es que las contracciones que se presentan se encuentran restringidas por las fuerzas de fricción desarrolladas entre las superficies en contacto de la carpeta asfáltica y la base, se generan entonces esfuerzos de tensión, que cuando exceden la resistencia a tensión del concreto provocan fisuración transversal en el pavimento, cuya separación y ancho dependerán, entre otras cosas, del tipo de material de las capas de apoyo.

1.2.3. Análisis de severidad de las fisuras

Es muy importante establecer un nivel de severidad para las fisuras, con el fin de dar un tratamiento adecuado a las mismas y de esta forma evitar el aumento del deterioro del pavimento. Distintos autores han propuesto mecanismos de identificación de severidad para las fisuras, entre los que se pueden encontrar:

- Manual centroamericano de mantenimiento de carreteras para pavimentos flexibles y rígidos; Jorge Coronado; Consejo sectorial de ministros de transporte de centro América; Guatemala; 2000.
- Manual para la inspección de pavimentos flexibles; Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Transportes - Instituto Nacional de Vías (INVIAS); Colombia; 2006.
- Department of Defence, Aircraft Pavement Maintenance Manual; Defence Corporate Services & Infrastructure; 2003.

Analizando cada una de las propuestas, se ha decidido proponer una clasificación que tenga en cuenta algunos de los anteriores criterios:

A. Fisuras Aisladas: Son las fisuras que se presentan en las primeras etapas del deterioro del pavimento sin formar ninguna clase de patrón entre ellas. Su nivel de severidad se determina de la siguiente manera:

- Bajo: Promedio de abertura inferior a 1 mm.

Incluye fisuras sin sellar y sin ramificaciones al igual que fisuras selladas de manera satisfactoria.

- Medio: Promedio de abertura entre 1 y 6 mm.

Aquí se puede tener un nivel medio-bajo, determinado si la fisura presenta patrones irregulares de severidad baja en los bordes con desportillamientos leves y abertura promedio entre 1 y 3 mm. Para fisuras que presenten ramificaciones con abertura promedio entre 3 y 6 mm se clasificará como un nivel de severidad medio-alto; tienen una gran probabilidad de infiltración de agua a través de ellas.

- Alto: Promedio de abertura mayor a 6 mm.

Presentan desportillamientos severos con patrones irregulares de severidad media en los bordes. Representan movimientos significativos para los vehículos y tienden a evidenciar una malla con sus ramificaciones.

La medición de la zona afectada se puede realizar en m de longitud de la fisura o en m² asumiendo un ancho de incidencia de 0.6 m.

B. Fisuras en Malla: Representadas principalmente por las fisuras en bloque y piel de cocodrilo, son las que generalmente representan una evolución de las fisuras individuales por falta de mantenimiento o cualquier otro aspecto. Su nivel de severidad se determina de la siguiente manera:

– Bajo: Promedio de abertura inferior a 2 mm.

Incluye un nivel bajo-bajo en el que las fisuras tienen una abertura inferior a 1 mm sin presentar desportillamientos y pueden o no estar selladas. Para el nivel bajo-alto las fisuras tendrán una abertura promedio entre 1 y 2 mm y presentarán un desportillamiento menor; si están selladas deberán impedir completamente la filtración de agua.

– Medio: Promedio de abertura entre 2 y 5 mm.

Aquí se puede tener un nivel medio-bajo, determinado por la presencia de un desportillamiento en los bordes con sello fallado y abertura promedio de las fisuras que constituyen la malla entre 2 y 3 mm. Para fisuras que presenten ramificaciones con abertura promedio entre 3 y 5 mm, evidencien sellos fallidos y un desportillamiento leve, se clasificarán como un nivel de severidad medio-alto.

– Alto: Promedio de abertura mayor a 5 mm.

Presentan desportillamientos severos en los bordes de la malla, que ya tienen polígonos pequeños y bien definidos. Algunos bloques pueden presentar

movimientos significativos por la presencia del tráfico que pueden terminar en la generación de un bache.

La medición de la zona afectada se realiza en m² de tal manera que se le asigne un nivel de severidad para cada parte; si la determinación del nivel de severidad se torna complejo se deberá registrar la zona completa con el nivel de severidad más alto evidenciado.

2. PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS A LA CAPA DE RODADURA

La reflexión de fisuras o calcado de fisuras en pavimentos consiste en la propagación de fisuras a través de la capa bituminosa hasta aparecer en la superficie del pavimento, como consecuencia de movimientos horizontales en las fisuras existentes que causarán deformaciones horizontales en la capa de rodadura. Este fenómeno es el principal defecto que se presenta en las capas bituminosas colocadas sobre pavimentos existentes deteriorados o sobre bases tratadas con cemento, las cuales tienen obligatoriamente juntas y/o fisuras transversales de origen térmico².

La capa agrietada puede ser una base estabilizada con cemento, un pavimento flexible o un pavimento rígido con losas agrietadas o con juntas transversales y longitudinales. En el primer caso puede tratarse de un pavimento nuevo, en los otros dos casos se trata de pavimentos que han sufrido deterioros tanto funcionales como estructurales, a los que se les debe colocar una capa de refuerzo bituminosa para la rehabilitación del mismo. La reflexión de fisuras se presenta con mayor frecuencia en los pavimentos de mezclas bituminosas, aunque se puede ver en casi todos los tipos de pavimentos³.

² Zhou, F., Scullion, T. y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test; 2004. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

³ Wen, H., Titi, H. y Berry, D; Study Of Rutting And Roughness In Asphalt Overlay And Local Calibration Of Roughness Prediction Model In 2002 Design Guide; 2005. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

Por ser la propagación de fisuras un proceso inherente al deterioro natural del pavimento, su completa eliminación no es posible, siendo esta situación causa del actual enfoque de estudios para retardar el fenómeno. Sin embargo, este tema se ha venido tratando desde principio de los años 70 mediante diferentes métodos, que si bien no dieron resultado sentaron las bases para las investigaciones recientes.

2.1. FENÓMENO DE LA REFLEXIÓN

Diversos investigadores tales como Makowki y Zhou, coinciden en que el fenómeno de la reflexión es uno de los factores más influyentes en el deterioro de los pavimentos con mezclas asfálticas. Las fisuras reflejadas ocasionan varios problemas, los más sobresalientes son:

- Entrada del agua al interior del pavimento, causando pérdida de capacidad de soporte de la estructura y salida de finos de las capas inferiores.
- Degradación del pavimento en las proximidades de la fisura.
- Deterioro de la superficie de rodamiento, disminuyendo la comodidad y seguridad de los usuarios.

Generalmente la reflexión de las fisuras no es un fenómeno puntual en el tiempo sino que se desarrolla a través de un proceso que según Colombier (1997) consta de las siguientes fases:

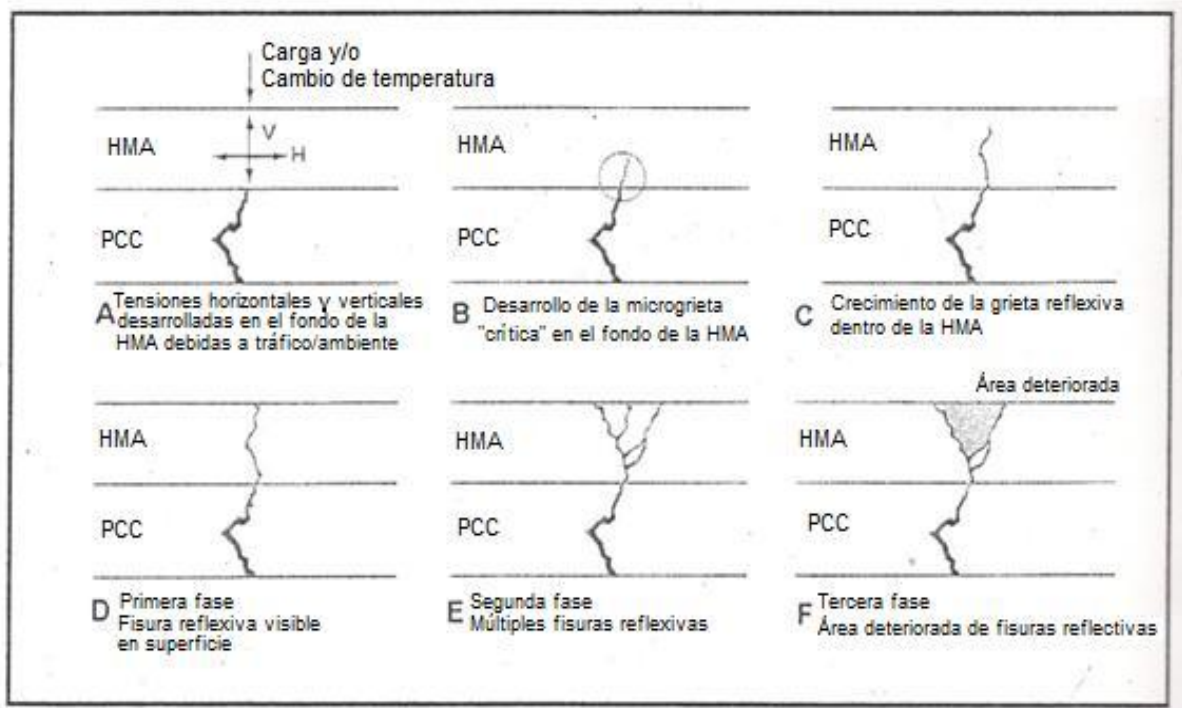
A. Iniciación: Se genera usualmente en el fondo de la capa bituminosa y se produce por la presencia o aparición de un defecto o de una discontinuidad en la capa subyacente. La velocidad de esta fase es función de la concentración de esfuerzos, del comportamiento de la capa inferior y de la interfaz. Se cree

que los efectos térmicos inciden considerablemente en el desarrollo de esta fase, especialmente cuando se trata de pavimentos rígidos.

- B. Propagación: Se caracteriza por un desarrollo lento y gradual a través del espesor de las capas inferiores, dependiendo del grosor y la rigidez de la capa superior. Este proceso comienza en lugares donde la estructura presenta defectos térmicos o mecánicos.
- C. Ruptura de la capa: Es la fase final, en la cual se ven evidenciadas las fisuras en la superficie del pavimento.

El tiempo que tarde en reflejarse una fisura a la superficie del pavimento depende de las condiciones particulares de cada caso.

Figura 2.1. Mecanismos de reflexión de fisuras en pavimentos semi-rígidos



Fuente: NAPA; Guidelines For Use Of HMA Overlays To Rehabilitation PCC Pavements.

Figura 2.2. Reflexión de fisuras en calzadas semi-rígidas



Fuente: Sergio Alejandro Pérez Romero; Approche experimentale et numerique de la fissuration reflective des chaussées.

Zhou et al (2004) menciona que el fenómeno se puede presentar dentro del año siguiente después de la construcción de la nueva capa de mezcla bituminosa, dependiendo de las solicitaciones impuestas por los factores que causan la reflexión de fisuras.

Se pueden presentar dos tipos de fisuras reflexivas en superficie: una fisura clásica individual o dos fisuras paralelas.

Figura 2.3. Representación de una fisura individual y de dos fisuras paralelas, respectivamente



Fuente: Zhou, F., Scullion, T. y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test.

Esta tipología ha sido estudiada por distintos autores como por ejemplo Negociante (1982), Gaarkeuken (1996) y Zhou (2002). En estas investigaciones los autores se ponen de acuerdo sobre el hecho que las fisuras dobles se producen a algunos centímetros del eje central donde se encuentran empalmes o fisuras y son menos frecuentes que las fisuras individuales.

Análisis realizados a través de 3D EF (Elementos Finitos) permiten concluir que este tipo de fisuras reflexivas sólo tienen lugar cuando los desplazamientos verticales son muy significativos, tal es el caso de capas bituminosas colocadas sobre bases estabilizadas con cemento. La prueba FABAC, utilizada por el Ingeniero Civil Sergio Alejandro Pérez Romero (2008), confirmó más tarde dichas conclusiones.

2.2. MECANISMOS DE INDUCCIÓN DE LAS FISURAS DE REFLEXIÓN

El fenómeno de la reflexión de una fisura es causado por tensiones de tracción y de corte en la capa bituminosa producidas por los movimientos horizontales y verticales de los bordes de las fisuras y juntas existentes en la capa inmediatamente inferior. A fin de definir correctamente el problema del aumento de fisura, es importante especificar adecuadamente los distintos parámetros que pueden desarrollar estos movimientos y analizar su naturaleza.

Existen tres tipos de fenómenos que generan los movimientos de los bordes de la fisura⁴:

A. Cargas de tráfico: Los ejes de los camiones que circulan cerca de los bordes de la fisura, inducen movimientos verticales y horizontales en la misma.

⁴ FHWA; Potential Applications of paving fabrics to reduce reflective cracking; 2005. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

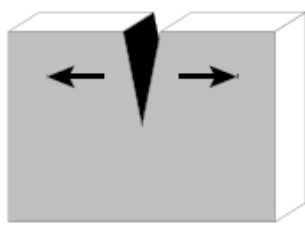
- B. Variaciones térmicas: Los cambios de temperatura pueden presentarse diariamente y estacionalmente, ocasionando dilataciones y contracciones, transformándose en movimientos horizontales que alternan entre la abertura y el cierre de las fisuras.
- C. Variaciones en el contenido agua del suelo: La pérdida de fuerza de sustentación del suelo por variaciones en el contenido de agua, por deslizamientos de tierra, entre otros, generan la abertura y el cierre de las fisuras.

Las fisuras existentes se diferencian en función de su forma, configuración, método de movimiento, amplitud, velocidad de deformación y propagación⁵:

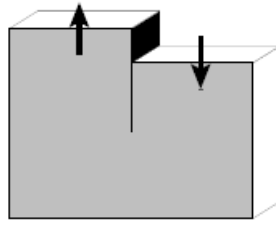
- Método de Movimiento: Los tres movimientos posibles de los bordes de la fisura se definen claramente y se clasifican según un esquema convencional de Irwin (1957):
 - Método I: Abertura y cierre de los bordes de la fisura.
 - Método II: Cizallamiento, deflexiones que producen rotura entre capas.
 - Método III: Desgarramientos.

⁵ Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration; 2002.

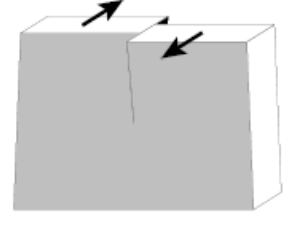
Figura 2.4. Movimientos de los bordes de una fisura (Métodos I, II, III)



Método I: Abertura



Método II: Cizallamiento

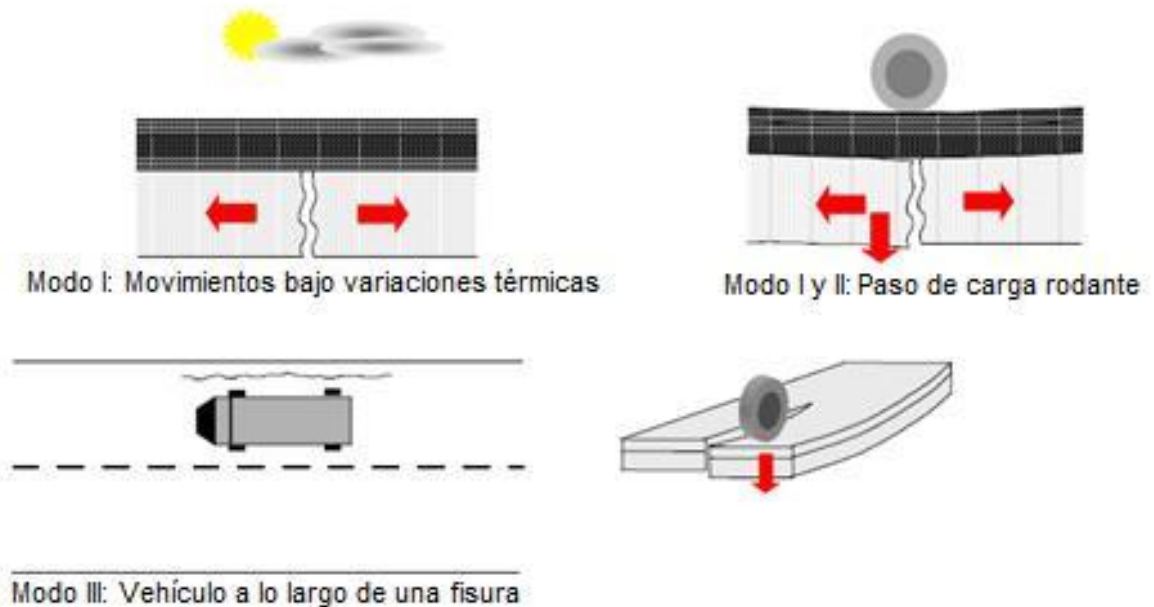


Método III: Desgarramiento

Fuente: Irwin; 1957.

Sobre la calzada, estos tres tipos de movimientos van a causar la ruptura de la capa de superficie según una combinación de las causas antes mencionadas :

Figura 2.5. Combinaciones de movimientos posibles de los bordes de una fisura



Fuente: Colombier, G.; Cracking In Pavements: Nature And Origin Of Cracks.

El método I está directamente asociado con la retracción térmica, o hidráulica del concreto, ocasionando la abertura y el cierre de las fisuras. Los agrietamientos por fatiga son una combinación de los 3 movimientos, dependiendo de la posición del vehículo sobre la calzada y de la geometría de la fisura existente. Para el caso de inestabilidad de la banca el movimiento predominante es el método II, sin embargo con la presencia del tráfico pesado se puede llegar a presentar los métodos I y III; al igual que en la fatiga, la posición del vehículo es un factor determinante en la caracterización del movimiento.

2.2.1. Cambios de temperatura

Los gradientes térmicos son el motivo por el cual se generan movimientos horizontales (Método I) de contracción y retracción, según sea el caso, en las capas del pavimento; estos desplazamientos horizontales producen esfuerzos de tensiones en la zona de la capa bituminosa que se encuentra inmediatamente encima de la fisura. Adicionalmente, las bajas temperaturas causan retracción de la mezcla bituminosa generando tensiones internas⁶.

El medio ambiente en el cual se encuentra expuesta la estructura, afecta directamente los cambios de temperatura y de humedad, los cuales se pueden traducir en variaciones diarias o en variaciones por el cambio de una estación a otra (variaciones estacionales). Las variaciones diarias se caracterizan por tener una frecuencia de movimiento lento y las variaciones estacionales, de verano a invierno, se identifican con movimientos aún más lentos. Estas contracciones se encargan de desarrollar esfuerzos que permiten el alabeo de losas y capas, al igual que la abertura o el cierre de las fisuras existentes.

⁶ FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006

La amplitud de los movimientos está determinada por la magnitud de los gradientes térmicos, el coeficiente de dilatación térmico de los materiales que conforman las capas y el espaciamiento entre fisuras o juntas. Generalmente la ruptura total de la estructura está asociada a una combinación de cargas de tránsito con variaciones térmicas, pero estudios recientes en Inglaterra⁷ han demostrado que los cambios estacionales, especialmente los que se presentan en el invierno, pueden llegar a ser tan grandes y con amplitudes tan fuertes que ocasionan el deterioro del pavimento aumentando considerablemente el ancho de las fisuras reflejadas sin que exista tráfico vehicular sobre la vía.

El movimiento más crítico que se puede presentar en las capas bituminosas, consiste en la abertura de la fisura produciendo esfuerzos de tracción horizontal; si la capa bituminosa resiste estas tensiones se puede presentar un despegue de las dos capas, lo cual retardará la reflexión de la fisura incrementando el deterioro de la superficie debido a que la misma aparecerá con ramificaciones, en caso contrario, la fisura se reflejará en forma rápida y sin ramificaciones⁸. La resistencia proporcionada por las mezclas bituminosas depende del nivel de adherencia entre las capas; se pueden presentar dos situaciones extremas: una con adherencia total y otra sin adherencia, lo conveniente sería que existiera una adherencia total para evitar ramificaciones de la fisura reflejada⁹.

2.2.2. Cargas de tráfico

Prieto (2006) propone que el tráfico pesado induce movimientos muy veloces, de alrededor de una décima de segundo, en donde su amplitud depende de factores

⁷ Nesnas, K. y Nunn, M.; A Model For Top-Down Reflection Cracking In Composite Pavements.

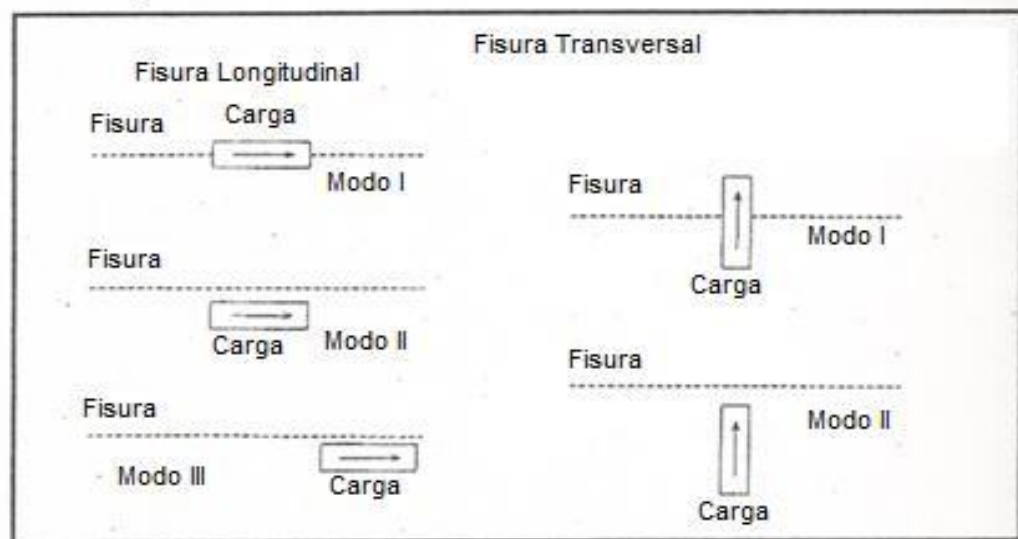
⁸ Rigo, J., M., Cescotto, S. y Kuck, P., J.; Evaluation Of Crack Propagation In An Overlay Subjected To Traffic And Thermal Effects; 1993.

⁹ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

tales como frecuencia y peso de los vehículos, deflexión de la estructura y la capacidad que tenga ésta de transferir la carga de un lado a otro de la junta o fisura.

La acción del tránsito puede inducir cualquiera de los tipos los movimientos explicados anteriormente según la posición que se tenga en relación a los vehículos y la orientación de juntas o fisuras respecto al eje de la vía. Colombier (1997) afirma que las fisuras longitudinales afectadas por la acción del tráfico pueden presentar cualquiera de los tipos de movimiento, mientras que las transversales solo presentarán los Métodos I y II, tal como se representa en la siguiente figura:

Figura 2.6. Relación de la posición de los vehículos con la orientación de las fisuras



Fuente: Pais, J.; Evaluation Of Reflective Cracking Resistance In Bituminous Mixtures; 2000.

De esta forma, un vehículo al pasar justo sobre una fisura longitudinal producirá el modo I, mientras que si se desplaza cerca producirá el modo II; cuando esté próximo a los extremos de la misma ocurrirá el modo III. En las fisuras

transversales se producirá el modo I cuando el vehículo se encuentre justo sobre la fisura y el modo II cuando se esté aproximando.

Una carga aplicada sobre una fisura o junta existente debajo de una capa bituminosa creará efectos de flexión y cortante sobre ella, causando una relación directa entre estos efectos y la propagación de la fisura¹⁰. La Figura 2.7. explica las solicitaciones experimentadas por la estructura, siendo la parte b) la flexión y las partes a) y c) las de cortante:

Figura 2.7. Solicitaciones experimentadas por la estructura del pavimento



Fuente: Francken, L., Vanelstraete, A. y Bondt, A.; Modeling and structural design of overlay systems; 1997.

En cuanto a la importancia relativa de cada caso relacionada a la reflexión de la fisura existen varias opiniones sobre cuál es el más importante.

El gradiente térmico genera de la misma manera efectos de tensión pero de mayor valor y con menor frecuencia que los generados por la acción del tráfico, excepto

¹⁰ Zhou, F., Scullion, T. y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking simulation test; 2004. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

cuando la transferencia de carga es pobre¹¹. La magnitud de estas tensiones depende principalmente de los espesores de la capa bituminosa, la capacidad de soporte del firme, la capacidad de transferencia de carga y la magnitud de las cargas. Un espesor significativo producirá una mejor transferencia de carga entre los bordes de la fisura, impidiendo así los movimientos relativos.

Se puede concluir que establecer un orden jerárquico con respecto a cual factor tiene mayor incidencia sobre la propagación de una fisura es muy relativo, ya que dependerá de muchos factores e incluso de muchas opiniones diferentes de los investigadores.

2.3. MÉTODO ANALÍTICO DE PROPAGACIÓN DE FISURAS

Para entender de manera completa todos los aspectos del fenómeno de la reflexión de fisuras en pavimentos, es necesario recurrir al modelamiento analítico del proceso. El tipo de propagación de la fisura es considerado por la Ley Empírica de París desarrollada por París y Erdogan (1963). Esta ley conecta el factor de intensidad del esfuerzo K a la velocidad de propagación de la fisura da/dN , mediante la siguiente expresión:

$$\frac{da}{dN} = A * K^n$$

Ecuación (2.1) Ley Empírica de París

Donde:

– da/dN : Aumento de la longitud de la fisura por ciclo de carga.

¹¹ FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

- K : Factor de intensidad de tensiones que describe el estado de esfuerzo en la punta de las fisuras. Depende del método de movimiento, los materiales, la longitud de la fisura y la geometría de la estructura.
- A, n : Constantes que indican las propiedades de fractura del material. Dependen de los materiales, la frecuencia y las condiciones de temperatura.

Para la predicción del aumento de la fisura debido al tráfico, el coeficiente n de manera general aumenta cuando la temperatura disminuye. Esto se puede afirmar, debido a que es coherente el hecho de que a bajas temperaturas los materiales bituminosos son más frágiles¹².

El parámetro A puede calcularse, según Molenaar, utilizando la relación empírica siguiente:

$$\log A = -2.36 - 1.14n$$

Ecuación (2.2) Relación empírica para el cálculo del parámetro A

La Ley de París implica que la fisura va a propagarse a partir de la iniciación de la misma como una discontinuidad plana a través del material, pero esta hipótesis no tiene en cuenta la heterogeneidad propia de los materiales bituminosos. Además, indica que si el factor de intensidad de tensiones disminuye, la propagación de la fisura también disminuye.

¹² Molenaar, A.; Evaluation Of Pavement Structure With Emphasis On Reflective Cracking; 1983. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

3. TÉCNICAS Y SISTEMAS ANTIRREFLEXIÓN DE FISURAS

A principio de los años 70 surge la necesidad de desarrollar estudios e investigaciones que permitieran encontrar soluciones a los problemas de deterioro de los pavimentos, especialmente los daños relacionados con la reflexión de fisuras. Este fenómeno se podría suprimir eliminando las deformaciones y tensiones soportadas por las capas bituminosas en las zonas ubicadas sobre las juntas y fisuras existentes; sin embargo, es poco factible eliminar estos factores por lo tanto, lo que se puede llegar a conseguir es una reducción en la velocidad de deterioro¹³.

Gracias a estas investigaciones, actualmente se pueden encontrar en el mercado gran variedad de productos y metodologías que ayuden a evitar y retardar la propagación de fisuras a la superficie, porque como se mencionaba anteriormente, no es posible su completa eliminación. La elección y aplicación de una técnica u otra dependerá de las características particulares de cada caso, como por ejemplo tipo y estado del firme, de las soluciones posibles y sus limitaciones, de la viabilidad según el criterio beneficio-costos y de las consideraciones constructivas.

Las diferentes técnicas y metodologías que evitan o retardan la reflexión de fisuras en los pavimentos, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- A. Prevención y tratamiento de fisuras antes de colocar la capa de superficie.
- B. Control de la propagación de la fisura.

¹³ FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

El grupo A tratará de prevenir la formación de fisuras durante la fase de construcción y se realizarán procesos de control a las fisuras existentes, evitando la propagación de las mismas hacia la superficie. El grupo B a través del uso de capas intermedias como mallas, geotextiles, entre otros, reforzará la estructura del pavimento retardando el fenómeno de reflexión. Una tercera opción se podría obtener al combinar técnicas de los dos grupos con el fin de conseguir mejores resultados.

En todos los casos, para retrasar el aumento de las fisuras, las soluciones previstas deben contemplar al menos uno de los dos objetivos siguientes¹⁴:

- Reforzar y mejorar la resistencia en la nueva capa para evitar la reflexión de la fisura existente en la capa subyacente.
- Guiar la fisura y retrasar la propagación con el fin de prolongar su tiempo de curso antes de cruzar el conjunto del grosor de la capa.

3.1. PREVENCIÓN Y TRATAMIENTO DE FISURAS ANTES DE COLOCAR LA CAPA DE SUPERFICIE

Según Laveissiere (2002) los factores más importantes que limitan la formación de fisuras durante la fase de construcción son:

A. Elección de los materiales: Los materiales como ligantes y concreto (para el caso de bases estabilizadas), deben seleccionarse teniendo en cuenta las condiciones climáticas y el tipo de mezcla. García (1992) sugiere algunos criterios que se deben tener en cuenta en la selección de los materiales tanto para las capas tratadas con conglomerantes hidráulicos como para las capas bituminosas.

¹⁴ STBA; 1999 y Zhang y Li; 2002.

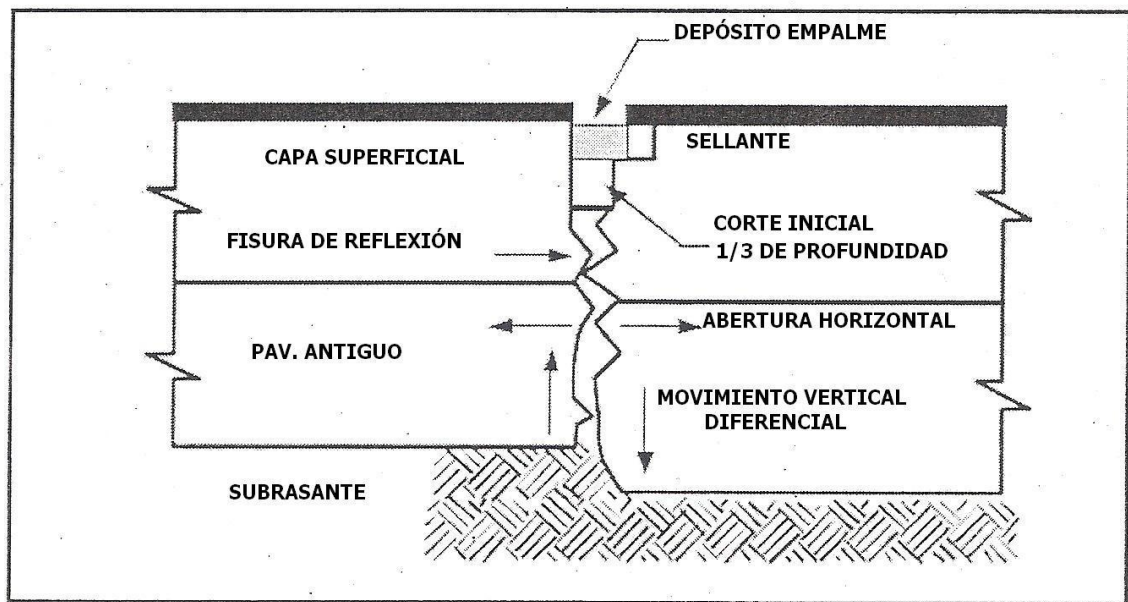
- B. Concepción de la calzada: Las calzadas deben diseñarse y calcularse con espesores adecuados que permitan cumplir las solicitudes de tráfico y variaciones térmicas, proporcionando resistencia a las tensiones generadas. Un insuficiente espesor de capa, se transforma en una insuficiencia en la capacidad de la vía que conlleva a una aceleración del fenómeno de reflexión por fatiga.
- C. Calidad de construcción: El éxito de la vía no depende solamente con tener un excelente diseño sino también depende del cumplimiento de todas las especificaciones en el momento de su construcción. Una mala adhesión entre las capas, juntas de construcciones longitudinales mal realizadas, entre otras cosas, son causas de fisuramientos que pueden ser evitadas respetando siempre las normas específicas para cada caso.

3.1.1. Corte, sellado y llenado de fisuras (Crack Seals)

Actualmente se cuenta con diferentes metodologías que permiten limitar los movimientos de las fisuras existentes aún cuando se vayan a utilizar sistemas antirreflexión, entre estas se encuentra el método de corte, sellado y llenado de fisuras.

Este tratamiento es una técnica de mantenimiento para prevenir y reducir el deterioro de un pavimento, aumentando su vida útil (de 2 a 4 años) y limitando su futura degradación. Su objetivo principal es evitar o retardar la reflexión de las fisuras, restringiendo la entrada y filtración del agua hacia el interior de la estructura del pavimento, evitando el daño de la capa de apoyo que podría generar inestabilidad del suelo, y otros problemas como por ejemplo el fenómeno de bombeo. También debe controlar y limitar los movimientos horizontales y verticales que conllevan al aumento progresivo de las fisuras existentes.

Figura 3.1. Cortado y sellado de juntas en la capa de superficie



Fuente: FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation.

El método consiste en marcar las juntas y fisuras existentes en el pavimento antiguo, de manera que en la capa de superficie se puedan realizar cortes sobre las marcas realizadas con anterioridad, para luego proceder a ejecutar el sellado correspondiente. Cuando la técnica se realiza de forma correcta la fisura de reflexión se forma en la zona debilitada por el corte, reduciendo de esta manera su ramificación. Es importante que el corte se realice exactamente encima de la junta o fisura, una desviación de 25mm puede causar la formación de una fisura secundaria¹⁵.

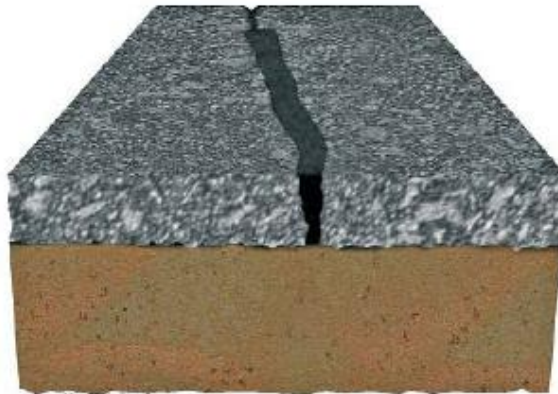
¹⁵ FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

Figura 3.2. Procedimiento de sellado de fisuras



Fuente: Orlando Alberto Villa Lora; Eficiencia de la técnica de sellado de fisuras en pavimentos flexibles.

Figura 3.3. Sellado de fisuras



Fuente: COMPOSAN; Sistemas por campos de aplicación.

Según el ancho, deterioro de bordes, movimiento horizontal y tipo de fisura se define el tratamiento a aplicar, sellado o llenado:

Tabla 3.1. Criterios de tratamiento según las características de la fisura

Características de la fisura	Tratamiento de fisuras	
	Sellado de fisuras	Llenado de fisuras
Ancho	3 – 25 mm	3 – 25 mm
Deterioro de bordes	Mínimo ó ninguno (<25% de la longitud de la fisura)	Mínimo ó ninguno (<50% de la longitud de la fisura)
Movimiento horizontal	≥ 3 mm	< 3 mm
Tipo de fisura	Fisuras transversales térmicas Fisuras transversales reflejadas Fisuras longitudinales reflejadas Fisuras longitudinales de juntas en frío	Fisuras longitudinales reflejadas Fisuras longitudinales de juntas en frío Fisuras longitudinales Fisuras en bloque espaciadas

Fuente: Orlando Alberto Villa Lora; Eficiencia de la técnica de sellado de fisuras en pavimentos flexibles.

La diferencia entre los procedimientos de sellado y llenado de fisuras radica en:

- El sellado se efectúa en el caso de presentarse fisuras activas, en donde sus constantes movimientos, hacen que el sellante sea capaz de mantener adheridas las paredes de la fisura, soportando la elongación hasta la máxima apertura de la fisura, recobrando sus dimensiones originales sin romperse, expandirse y contraerse en un rango de temperaturas, y resistir la abrasión y el daño causado por el tráfico.
- El llenado se realiza en fisuras inactivas o con poco movimiento para evitar principalmente la filtración de agua y de materiales incompresibles dentro de la fisura. El material de llenado, al igual que el sellante, debe mantenerse pegado a las paredes de la fisura, tener cierta elasticidad, y resistir a la abrasión y el daño causado por el tráfico.

Este método tiene a su favor la facilidad de su uso y aplicación, y cuenta principalmente con el hecho de ser económicamente viable, para lo cual, en países como Colombia que posee limitados recursos de inversión, el tratamiento se convierte en una técnica muy atractiva por encima de otras alternativas cumpliendo con la meta de prolongar la vida útil de los pavimentos a costos moderados. Sin embargo, por más que el tratamiento resulte económicamente factible, se debe evitar el exceso de sellado de fisuras, tal y como se puede observar en la Figura 3.4.; en estos casos será indispensable estudiar y analizar otras opciones que den soluciones al deterioro continuo del pavimento.

Figura 3.4. Exceso de sellado de fisuras



Fuente: Fabián Schvartzter; Innovaciones tecnológicas viales en mantenimiento.

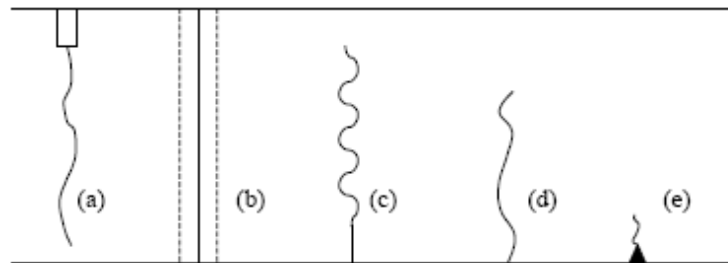
3.1.2. Prefisuración para bases estabilizadas

En las bases estabilizadas pueden presentarse fisuras por diferentes razones como los gradientes térmicos, retracción por fraguado, entre otros. Para evitar o retardar la reflexión de las fisuras existentes a las capas bituminosas, se puede recurrir al uso de la prefisuración de las bases en el momento de la construcción de la calzada. Esta técnica consiste en controlar la ubicación de las fisuras generadas fisurando la base antes de colocar la capa de superficie.

El procedimiento consiste en crear fisuras finas y regularmente espaciadas (de 2 a 3m), que van a conseguir que los movimientos de los bordes de las fisuras sean menores que los que se presentan cuando se desarrollan fisuras naturales. Por lo tanto, en la capa de superficie se observará que las fisuras reflejadas se caracterizarán por tener una regularidad y no se mostrarán en forma de ramificaciones, lo cual facilitará los trabajos de mantenimiento a través del uso de técnicas como por ejemplo los tratamientos superficiales.

En la actualidad se utilizan 5 diferentes técnicas de prefisuración:

Figura 3.5. Esquema de las técnicas de prefisuración



Fuente: Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems; 1997.

- A. Se realiza una abertura en la parte superior de la capa base con una profundidad entre $1/3$ y $1/4$ del espesor de la capa.
- B. Sistema CRAFT (Creación Automática de Fisura Transversal): Se crea una abertura rectilínea en la capa base antes de compactarla, inyectando una emulsión de betún de rotura rápida. Se genera una zona de baja resistencia vulnerable al agrietamiento, en la cual el betún se encarga de actuar como impermeabilizante de las paredes de la fisura formada.

Figura 3.6. Equipo para prefisuración CRAFT



Fuente: EUROVIA; Techniques anti-remontées des fissures.

C. Junta Activa: A través de la ejecución de un surco, se introduce en la parte inferior de la capa un elemento de junta en PVC con perfil ondulado. Su altura es cercana a los $\frac{2}{3}$ del espesor de la capa, su longitud es de 2m o más, su espaciamiento está entre los 2 y 3 m en el sentido transversal y su ubicación es en el centro de cada carril. Su forma sinusoidal permite que exista la transferencia de cargas a través del entrelazado de las paredes de la fisura.

Figura 3.7. Equipo para prefisuración junta activa



Fuente: SACER; Techniques anti-remontées des fissures.

D. Técnica OLIVIA: La fisura es inducida introduciendo una tira de material plástico flexible, de altura aproximadamente a $1/3$ del espesor de la capa y grosor de $80\mu\text{m}$. Debido a su flexibilidad, puede deformarse adaptándose a la forma de los agregados, para una mejor transferencia de carga.

Figura 3.8. Equipo para prefisuración OLIVIA



Fuente: EUROVIA; Techniques anti-remontées des fissures.

E. Con esta técnica, se busca disminuir la sección transversal de la capa tratada con el fin de localizar la fisura, recurriendo al uso de la colocación de un perfil triangular de madera en el fondo de la capa.

3.1.3. Lechadas (Slurry Seals)

Las lechadas consisten en una mezcla de emulsión asfáltica, agregados, agua y aditivos; permiten estabilizar losas, a través de lechadas de cemento, y estabilizar capas bituminosas por medio de lechadas asfálticas. A través de la inyección de las lechadas, se rellenan los huecos existentes en las capas de superficie, especialmente los que se forman en las esquinas en el caso de las losas, reduciendo las deflexiones y los movimientos verticales relativos en los bordes de las juntas y fisuras¹⁶, aumentando la vida útil del pavimento de 3 a 4 años, entendiendo claramente que la capacidad estructural no se incrementa. No es recomendable utilizar esta metodología cuando el pavimento presenta fisuras en forma de piel de cocodrilo, se debe entonces recurrir al uso de otras alternativas.

Figura 3.9. Ejemplo de utilización de lechada asfáltica



Fuente: Fabián Schvartzter; Innovaciones tecnológicas viales en mantenimiento.

¹⁶ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

Figura 3.10. Procedimiento de aplicación de lechada asfáltica



Todas las técnicas y metodologías explicadas anteriormente tienen un fuerte atractivo gracias a que se caracterizan por ser económicos, fáciles de aplicar y durables; sin embargo, es necesario realizar inspecciones continuas y profundas que permitan conocer el verdadero estado de deterioro del pavimento con el fin de poder seleccionar entre todas las alternativas posibles, la que mejor se adapta a las particularidades de cada caso para utilizarla como tratamiento.

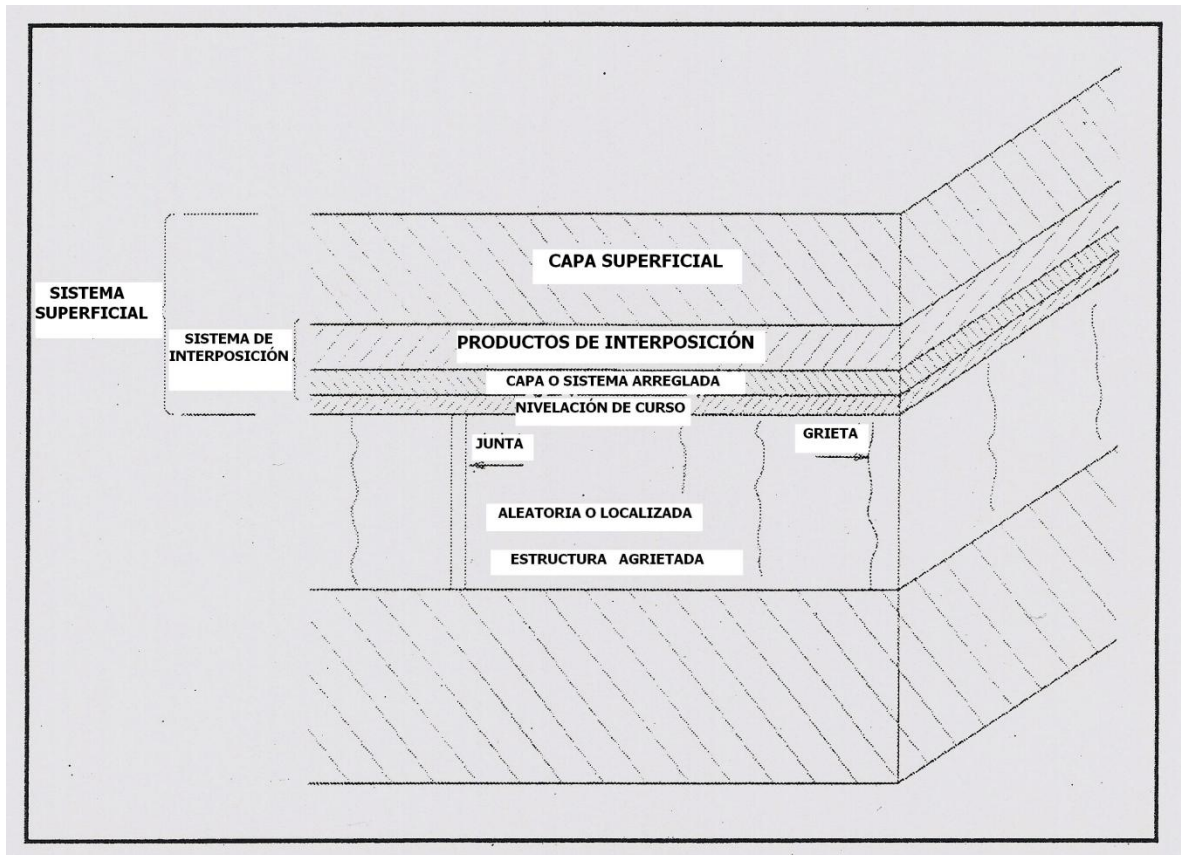
3.2. CONTROL DE LA PROPAGACIÓN DE LAS FISURAS

La experiencia indica que la rehabilitación de pavimentos agrietados con capas constituidas solo por un manto bituminoso es rara vez una solución duradera, pues de no tomarse precauciones adicionales las fisuras se propagarán en forma rápida a través de la capa bituminosa¹⁷. Por tal motivo se ha planteado el uso de una metodología denominada Sistema de Interposición, la cual consiste en un sistema combinado por tres capas (capa de nivelación, capa de interposición, capa de

¹⁷ FHWA; Potential Applications Of Paving Fabrics To Reduce Reflective Cracking; 2005. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

rodamiento), colocadas sobre la calzada deteriorada, logrando que la reflexión de la fisura se convierta en un procedimiento más difícil y lento. Dependiendo de la calidad de la estructura antigua, de las cargas del tráfico y del tipo de refuerzo elegido, una o dos capas pueden no ser indispensables.

Figura 3.11. Representación de una estructura de pavimento



Fuente: Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems .

Los componentes empleados y la combinación del sistema aplicado, son los factores principales que permitirán que el sistema desempeñe adecuadamente sus funciones. Si la construcción del sistema se efectúa cumpliendo de manera correcta con todas las especificaciones, la capa de interposición deberá "absorber" los movimientos de las fisuras generadas por gradientes térmicos, etc., sin transmitirlos a la capa de rodamiento; sin embargo, sus propiedades elásticas no

deberán desarrollar deformaciones de gran magnitud en la capa de rodamiento, pues de lo contrario, ésta fallará por fatiga¹⁸.

3.2.1. Capa de Nivelación

Se utiliza cuando un pavimento a rehabilitar tiene una superficie desigual, su función es proveer una superficie plana que permita colocar el sistema antirreflexión; esta capa generalmente consiste de una mezcla bituminosa densa con tamaño máximo de áridos cercano a 7mm¹⁹. En el caso de los pavimentos bituminosos una opción para constituir esta capa, es reciclar en frío y en el sitio, la parte superior de la capa bituminosa.

3.2.2. Capa de Interposición

Conocida también como “Sistema Antirreflexión” y consiste en una capa que se coloca entre la capa agrietada y la capa bituminosa. Sus funciones principales son:

- Reforzar la capa bituminosa reduciendo las tensiones lentas de los gradientes térmicos encima de las fisuras. El producto de interposición como los geotextiles, entre otros, cumple el papel de reforzar la estructura, teniendo en cuenta que los mismos deben conservar una rigidez suficiente para soportar adecuadamente las tensiones rápidas debidas a las cargas de tráfico.
- Proporcionar una capa flexible que permita la deformación horizontal de la estructura sin que se rompa y absorber los movimientos de magnitud amplia que se producen en los bordes de las juntas, evitando su reflexión. Esta

¹⁸ Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration; 2002.

¹⁹ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

función es efectuada de forma correcta por productos como los tejidos impregnados, SAMI y hormigones bituminosos de arena.

- Impermeabilizar la estructura del pavimento incluso después de la aparición de las fisuras en la superficie.

No todos los productos utilizados como sistema antirreflexión pueden desempeñar simultáneamente las funciones anteriores; como ejemplo la Tabla 3.2. presenta algunos de los materiales como sistema antirreflexión y las funciones que pueden desempeñar en la estructura del pavimento.

Tabla 3.2. Funciones que desempeñan algunos materiales como sistema antirreflexión

TIPO DE SISTEMA ANTIRREFLEXIÓN	F U N C I Ó N		
	REFUERZO	RESISTIR GRANDES DEFORMACIONES	IMPERMEABILIZAR
Arena- betún		●	●
SAMI		●●	●●
Geotextil no tejido impregnado		●●	●●
Mallas	● / ●● (*)		● (**)
Redes de acero	●●	● (***)	● (**)
Combinación malla-geotextil no tejido	● / ●● (*)	●●	●●

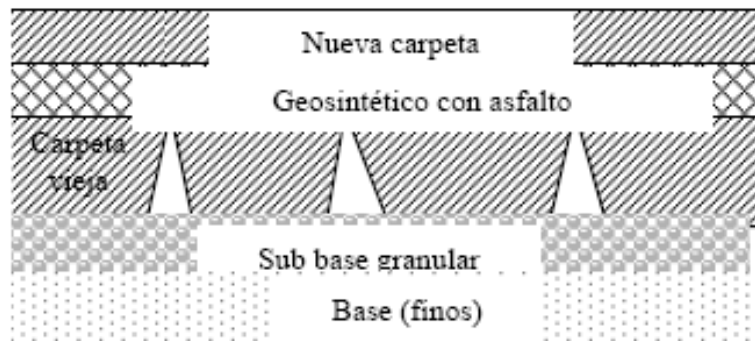
- : Eficiente
- : Muy eficiente
- (*) : La función de refuerzo depende del producto y de las condiciones de temperatura,
- (**) : Solo en el caso de mallas o redes de acero embebidas en lechadas.
- (***) : Solo en el caso de redes de acero embebidas en lechadas con ligantes de elastómeros.

Fuente: Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems.

Un sistema de interposición actuará como un producto de refuerzo si el módulo de rigidez es más elevado que el módulo de la capa de superficie. Esto depende del tipo de sistema de interposición y también de la temperatura de la estructura en que actúa. La acción eficaz del sistema de interposición puede revelarse solamente durante la fase de propagación. Es necesario hacer énfasis en el hecho

de que una buena adherencia es indispensable para este tipo de producto con el fin de tener una distribución de los esfuerzos repartidos en toda la estructura de la calzada. La baja adherencia favorecerá al contrario el crecimiento de fisuras por fatiga en la capa superficial²⁰.

Figura 3.12. Uso de un sistema de interposición



Fuente: INVEAS Informa; Refuerzo de carpeta de repavimentación con malla de poliéster.

3.2.2.1. Geotextiles

Los Geotextiles son un fieltro o un manto fabricado con fibras sintéticas, cuyas funciones se basan en la capacidad de filtración y en sus altas resistencias mecánicas, siendo éstas:

- Separar.
- Filtrar.
- Drenar.
- Reforzar.
- Proteger.

²⁰ Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration; 2002.

Pueden fabricarse de diferentes formas y sus aplicaciones abarcan prácticamente todos los campos de la ingeniería civil en donde se esté en contacto con el terreno. El geotextil es un material textil (tejido) permeable, a base de polímero (natural o sintético), pudiendo ser no tejido (de fibra cortada o filamento continuo) o tejido, usado en contacto con el suelo o con otros materiales²¹.

El Sistema está compuesto generalmente por una tela de polipropileno no tejida saturada con una capa de ligante (como betún), y se puede colocar entre el pavimento original y una sobrecapa de asfalto, o entre la base y un pavimento nuevo. El geotextil sirve básicamente como depósito para retener una determinada cantidad de ligante, mientras que éste es el encargado de deformarse siguiendo los movimientos del soporte fisurado, haciendo que la fisura deslice horizontalmente, disipando su transmisión a la capa superior. Los geotextiles utilizados para la conformación del sistema, tienen las siguientes características²²:

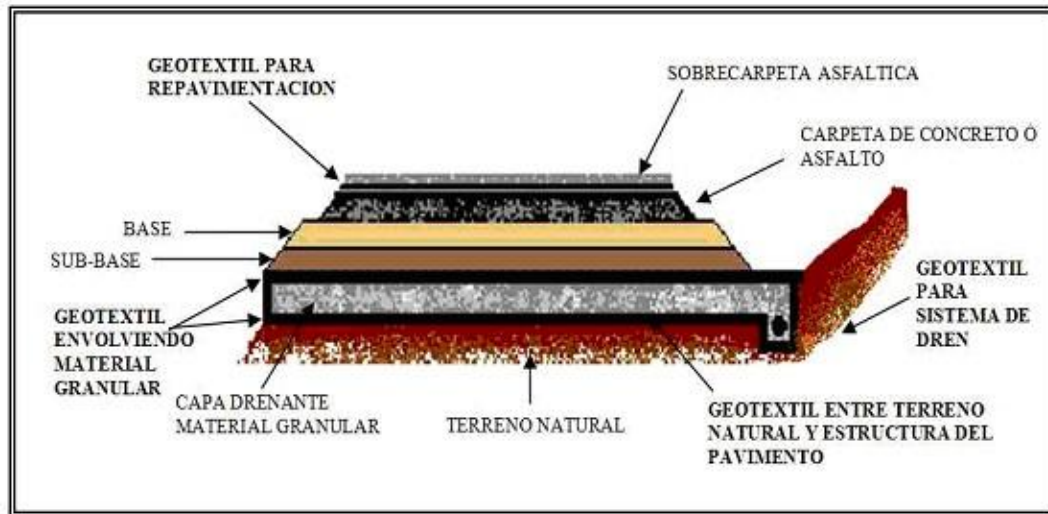
- No tejidos (los tejidos presentan propiedades mecánicas anisotrópicas que hacen que su efectividad no sea igual en todo el plano, son menos deformables y presentan menor capacidad de saturación).
- De filamentos continuos (las fibras cortas o largas reducen la resistencia del geotextil y se adhieren fácilmente a los neumáticos durante su instalación).
- A base de polipropileno (es más resistente a los álcalis, asegura una buena adhesividad con el betún al impregnarse bien por su baja densidad y no funde a las temperaturas de extendido de la mezcla asfáltica de rodadura).
- Con fibras ligadas mecánicamente por agujeteado (lo que da volumen al geotextil para retener la cantidad óptima de ligante bituminoso).

²¹ Botasso, G., Fensel, E. y Ricci, L.; Caracterización De Geosintéticos Para Uso Vial.

²² COMPOSAN; Sistemas Por Campos De Aplicación.

El geotextil funciona como soporte del asfalto, siendo verticalmente incompresible. Ningún geotextil puede ser usado para trabajar como refuerzo mecánico, debido a la baja rigidez de cada uno de ellos.

Figura 3.13. Usos de los geotextiles



Fuente: Gemia.

La función principal de los geotextiles es resistir físicamente la formación de las fisuras en la capa bituminosa²³, proceso que ha sido comprobado, prolongando por lo tanto la vida útil de las carreteras debido a que:

- La inclusión de la entre-capa de geotextil aumenta la resistencia a la fatiga del pavimento debido a su capacidad para reducir la transferencia de los esfuerzos inducidos por el tráfico en la cercanía de las fisuras, actuando como una membrana amortiguadora de esfuerzos. De la misma forma, absorbe los esfuerzos entre la capa de pavimento antiguo y la capa de pavimento nuevo,

²³ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

permitiendo movimientos leves dentro de la intercapa de geotextil, suministrando una capa flexible de suficiente espesor.

- La saturación del geotextil con la capa ligante, permite que actúe como una barrera de humedad impermeabilizando la estructura del pavimento, manteniendo su resistencia. Al evitar la infiltración del agua, se previene la reducción de la resistencia al corte de las capas, y al evitar la entrada de oxígeno, se previene el envejecimiento de la capa superficial, seguidamente de la formación de fisuras debido a la fragilización de la estructura. De estudios realizados se ha concluido que las 2/3 partes del alivio de esfuerzos se debe al ligante que satura al geotextil.

El efecto positivo del sistema dependerá de factores como: tipo de tejido, tipo de mezcla asfáltica, impregnación y ejecución general. La FHWA (2001), considera que los mejores resultados se han obtenido cuando el geotextil se coloca dentro de la capa, lo que requiere dos aplicaciones de mezcla bituminosa. Se ha encontrado que los geotextiles son más efectivos en prevenir la reflexión de las fisuras longitudinales, donde los movimientos horizontales son más pequeños, y en climas calientes y suaves.

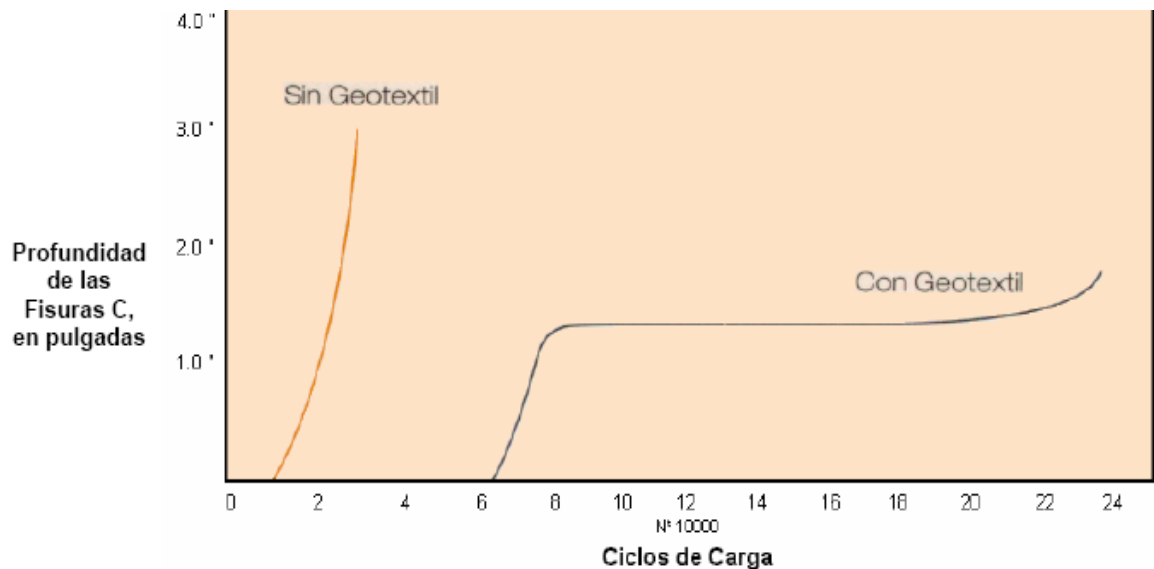
Figura 3.14. Sistema de interposición con geotextiles



Fuente: COMPOSAN; Sistemas por campos de aplicación.

En la Figura 3.15 se puede observar que los pavimentos que utilizan como intercapa un geotextil, experimentarán menos esfuerzos desarrolladores de fisuras internas, que los pavimentos que no tienen ningún sistema de interposición:

Figura 3.15. Respuesta a la fatiga de la capa de repavimentación asfáltica



Fuente: PAVCO; Manual de repavimentación con geotextiles.

El proceso de impregnación del ligante consiste en que sobre el pavimento antiguo se riegue una emulsión bituminosa que tenga 1.1Kg/m^2 de residual de betún. Sobre esta emulsión se extiende el geotextil, que mediante cepillos queda completamente impregnado y pegado al antiguo pavimento debido a la emulsión. La elección de un tipo u otro de geotextil se resuelve en función del grado de fisuración, de la porosidad del pavimento antiguo, de la humedad y de la temperatura ambiente.

Figura 3.16. Representación del proceso de colocación del geotextil en sus primeras etapas

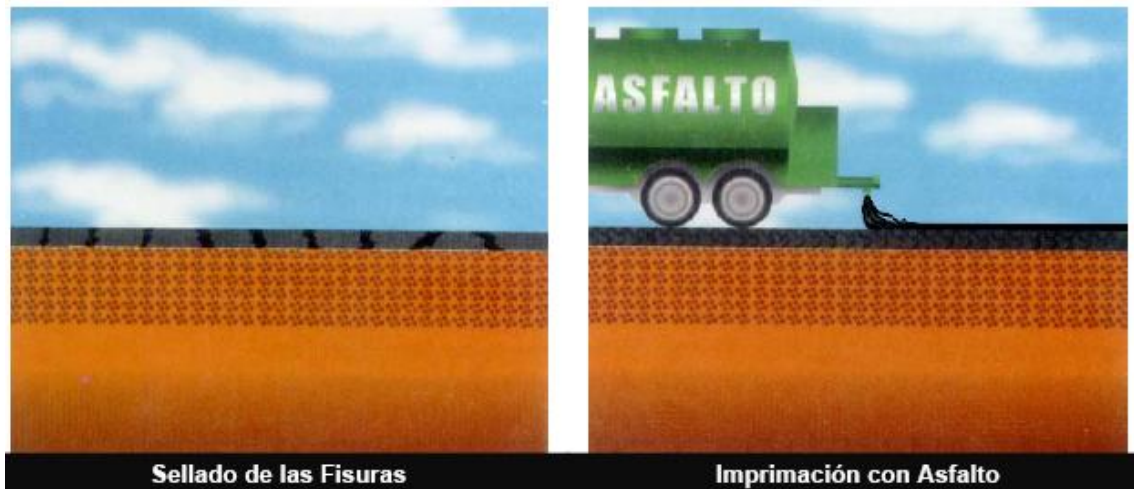
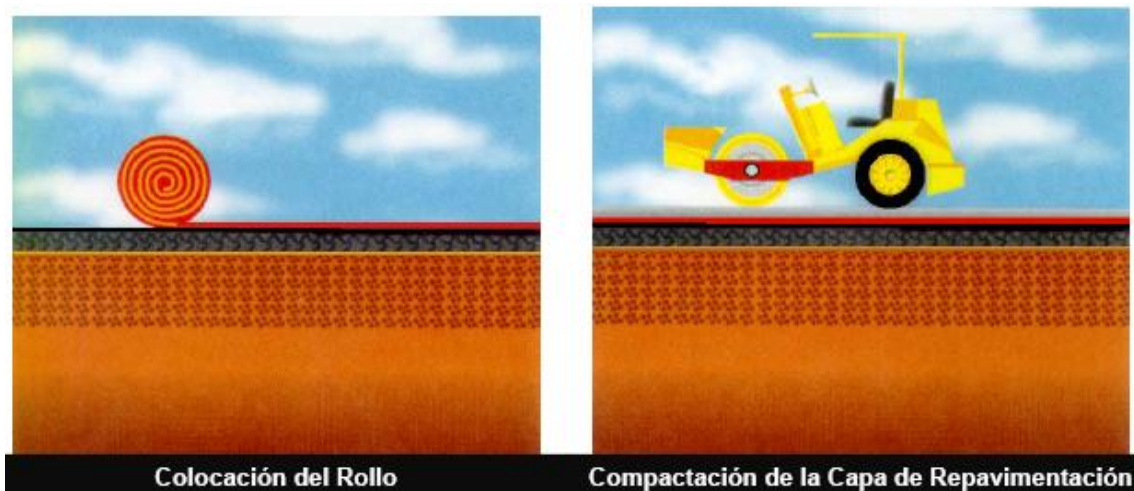


Figura 3.17. Representación del proceso de colocación del geotextil en su fase final



Fuente: PAVCO; Manual de repavimentación con geotextiles.

3.2.2.2. *Mallas*

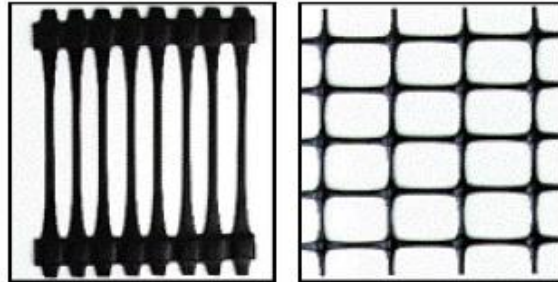
En el mercado actual se pueden encontrar gran variedad de mallas según los diferentes productos utilizados para su fabricación. Existen por ejemplo mallas metálicas, geomallas, mallas de zinc, malla de nylon, y muchas más; pero para este caso en particular, se hablará de dos tipos de mallas: geomallas o geogrillas y mallas de fibra de vidrio, que son utilizadas frecuentemente para manejar el fenómeno de la reflexión en pavimentos, debido a que se han realizado estudios e investigaciones previos que han permitido comprobar su efectividad. Se ha demostrado también, que su utilización como refuerzo de los pavimentos, permite disminuir sustancialmente el espesor total de las capas asfálticas, para obtener la misma vida de servicio, pero a un menor costo, que los sistemas tradicionales y sobre todo con mejores resultados.

A. Geomallas o Geogrillas:

Son estructuras planas a base de polímero constituidas por una malla abierta y regular de elementos resistentes a la tracción, pudiendo estar fabricados por láminas perforadas o tejidos ligados por procesos térmicos, en la cual las aberturas tienen dimensiones superiores a las de los constituyentes. Además pueden ser estiradas para mejorar sus características mecánicas (láminas perforadas) o directamente fabricadas por los métodos textiles tradicionales (tejidos)²⁴.

²⁴ Botasso, G., Fensel, E. y Ricci, L.; Caracterización De Geosintéticos Para Uso Vial.

Figura 3.18. Esquema de las geomallas y geogrillas



Fuente: Botasso, G., Fensel, E. y Ricci, L.; Caracterización De Geosintéticos Para Uso Vial.

Las geomallas deben cumplir con unas especificaciones para que puedan responder adecuadamente ante la permanente repetición de cargas dinámicas, que le exigen mantener resistencia a la tensión, absorbiendo los esfuerzos de tracción horizontal gracias a su alargamiento cero, transmitiéndolos a las capas subyacentes, para no permitir deformaciones en el pavimento y reducir la velocidad de propagación de las fisuras. Estas son:

- Tener una alta resistencia y un alto módulo.
- Su superficie debe generar fricción.
- Sus aberturas deben ser de un tamaño que permita una buena interacción con el suelo.
- Garantizar una baja plasto-deformación (creep) a largo plazo.

Figura 3.19. Geomalla de refuerzo



Fuente: HUESKER S.A.; Geomallas de refuerzo de firmes asfálticos.

La utilización de las geomallas como elementos de refuerzo de mezclas bituminosas agrietadas se basa en que cuando entre dos de estas capas, una de ellas agrietada y la otra no, se coloca un material de mayor rigidez que la de las capas, este material “coserá los bordes de la fisura” limitando su movimiento y absorbiendo las tensiones al trabajar a tracción (transmitiendo hacia arriba una pequeña parte): no se trata de disipar el movimiento sino de evitarlo, por lo que funcionarán siempre que los esfuerzos de transmisión de fisuras sean menores que la resistencia a rotura de la geomalla²⁵.

²⁵ COMPOSAN; Sistemas Por Campos De Aplicación.

Figura 3.20. Sistema de interposición con geomallas



Fuente: COMPOSAN; Sistemas Por Campos De Aplicación.

B. Mallas de Fibra de Vidrio:

Esta grilla está compuesta por una malla de fibra de vidrio asociada a un poliéster. No se trata de una sola grilla, sino de diferentes grillas con distintas resistencias mecánicas que tratan varios tipos de problemas. Tienen como función mejorar la resistencia a la fatiga de calzadas antiguas o nuevas y de eliminar o retardar la aparición de las fisuras.

Figura 3.21. Grilla de fibra de vidrio



Con Emulsión

Detalle de la Grilla después de la Emulsión

Fuente: Prieto, X; Santiago Sin Espaldas Encorvadas.

Para el caso de capas tratadas con concreto asfáltico, como las bases estabilizadas, la grilla mejora el comportamiento estructural, siempre y cuando sea ubicada dentro de la zona de tracción del pavimento. Además su composición asegura una excelente estabilidad dimensional durante el extendido de la capa de asfalto, no siendo alteradas por las altas temperaturas asociadas a esta tarea.

El mecanismo funciona gracias a que la malla actúa como un refuerzo de la capa, creando un material compuesto que combina la fuerza compresiva de la mezcla de asfalto con la fuerza de tensión de las fibras de vidrio. Al ser introducida dentro de la base de la capa, las fisuras que se propagan hacia la superficie son interceptadas, previniendo la migración de las mismas, re-direccionándolas horizontalmente, como se observa en la Figura 3.22.

Figura 3.22. Re-dirección de la fisura: En el primer esquema se encuentra un pavimento sin refuerzo de grilla, por lo tanto las fisuras se propagan a la superficie. En la segunda parte se observa como las fisuras cambian de dirección gracias al refuerzo de la grilla.



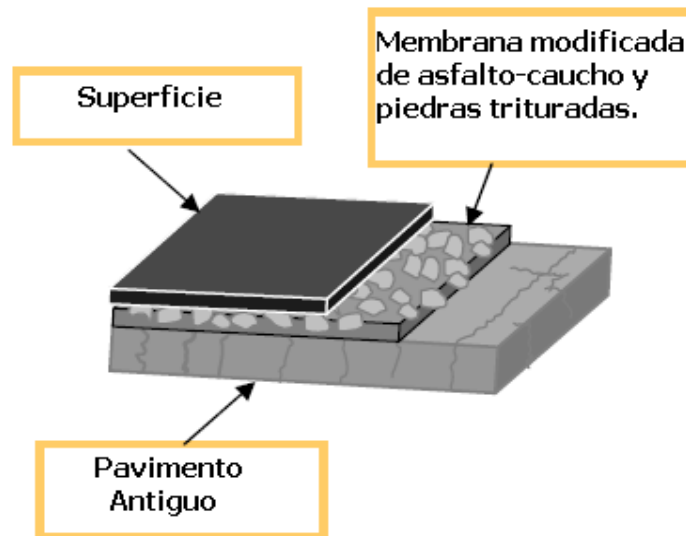
Fuente: Tensar International; Glasgrid. Pavement Reinforcement System.

3.2.2.3. Membranas absorbentes de tensión

Esta técnica es conocida como Sistema SAMI (Stress-absorbing membrane interlayer) y es considerada como una de las mejores metodologías para alargar la vida útil de las carreteras. Se basa en la interposición de una capa delgada entre el pavimento antiguo y la capa de superficie, que actúa como membrana absorbente de los esfuerzos mecánicos y de los movimientos de las fisuras evitando su propagación a la capa bituminosa.

La membrana absorbente de tensión, consiste en una capa modificada con caucho caliente y cemento asfáltico, aplicada sobre un pavimento agrietado existente, el cual es recubierto con una capa de piedra triturada. El SAMI es compactado y limpiado antes de ser cubierto por una nueva capa de superficie bituminosa.

Figura 3.23. Configuración del Sistema SAMI

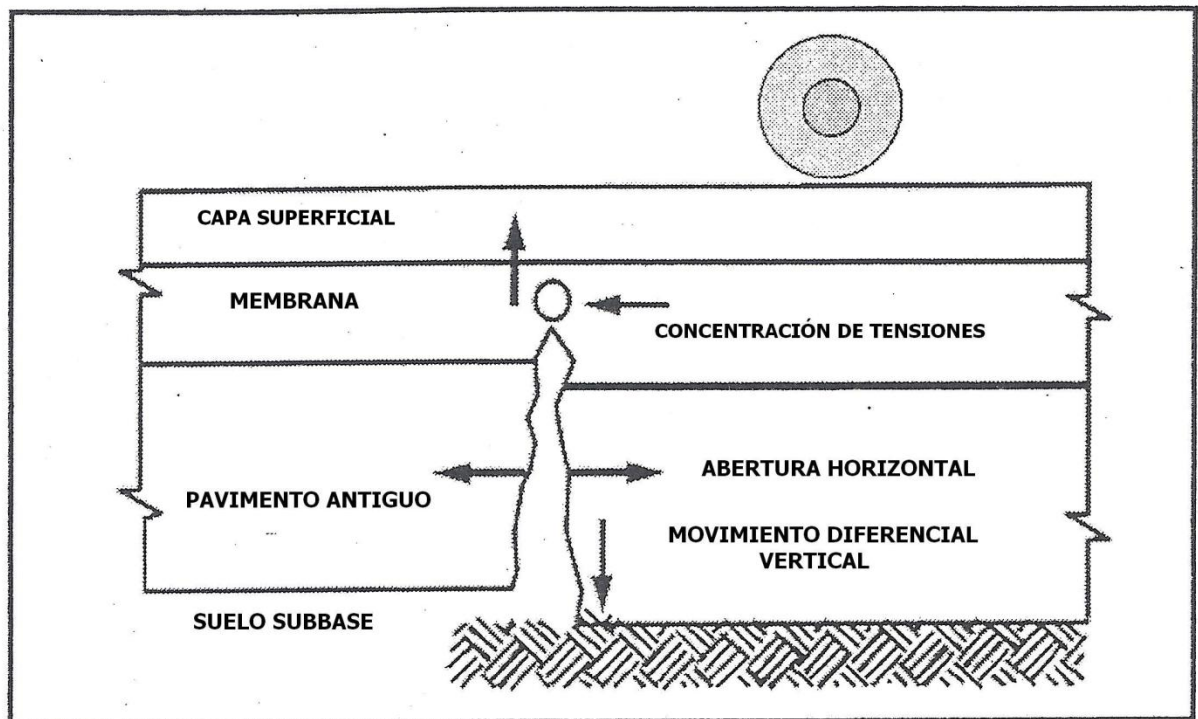


Fuente: Clemson University; Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI).

El SAMI es una aplicación de mantenimiento usado para prevenir que las fisuras del pavimento antiguo causen fisuras en la superficie del nuevo pavimento; esto aumentará la vida útil del pavimento y reducirá los requisitos de mantenimiento de la estructura.

Esta técnica ha demostrado gran eficiencia en la reducción de la cantidad y severidad de las fisuras de reflexión en las capas bituminosas construidas sobre pavimentos con fisuras de fatiga²⁶.

Figura 3.24. Esquema de un sistema SAMI



Fuente: FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001.

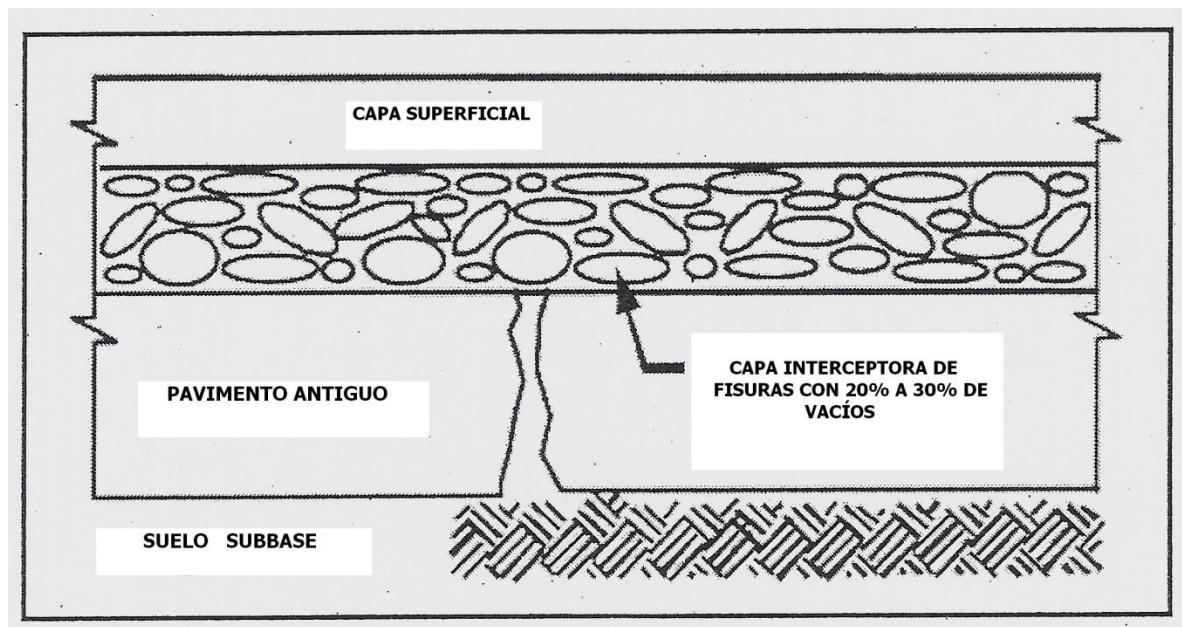
²⁶ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

3.2.2.4. Intercapas Granulares

Consiste en la construcción de una capa granular sobre la estructura del pavimento existente como parte del refuerzo; ésta capa es llamada Refuerzo Granular y está conformada por áridos de tamaño grande, bajo contenido de finos y altos volúmenes de huecos (entre 20% y 30%) que actúa de tal forma que interceptan el desarrollo de las fisuras de reflexión, evitando realizar otras reparaciones como parcheos, etc.

El Asphalt Institute recomienda dos tipos de granulometrías, una con un tamaño máximo del árido de 75mm y otra con un tamaño máximo de 50mm. El espesor mínimo de estas capas es de 90mm, lo cual puede limitar su uso en ciertas áreas²⁷.

Figura 3.25. Esquema de una intercapa granular

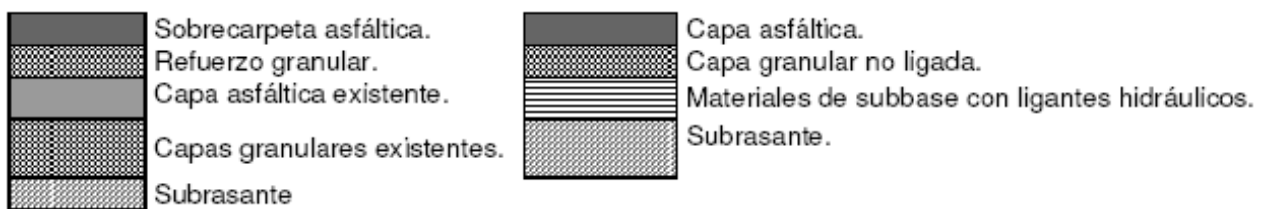


²⁷ Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

Fuente: FHWA; PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation; 2001.

En algunas regiones de Colombia esta técnica se denomina “Sándwich” por la configuración de la estructura constituida por la capa granular entre las carpetas asfálticas vieja y de refuerzo. En ese orden de ideas, puede establecerse una relación con las *estructuras inversas de pavimento* presentes en el French Design Manual for Pavement Structures (LCPC; 1997), específicamente por la función de la capa granular en el control de reflexión de fisuras de capas subyacentes ligadas, en el caso francés con ligantes hidráulicos en estructuras nuevas²⁸.

Figura 3.26. Estructura rehabilitada con refuerzo granular y estructura inversa, respectivamente



Fuente: Luis Carlos Vásquez Torres, Luis Ricardo Vásquez Varela; Refuerzos Granulares.

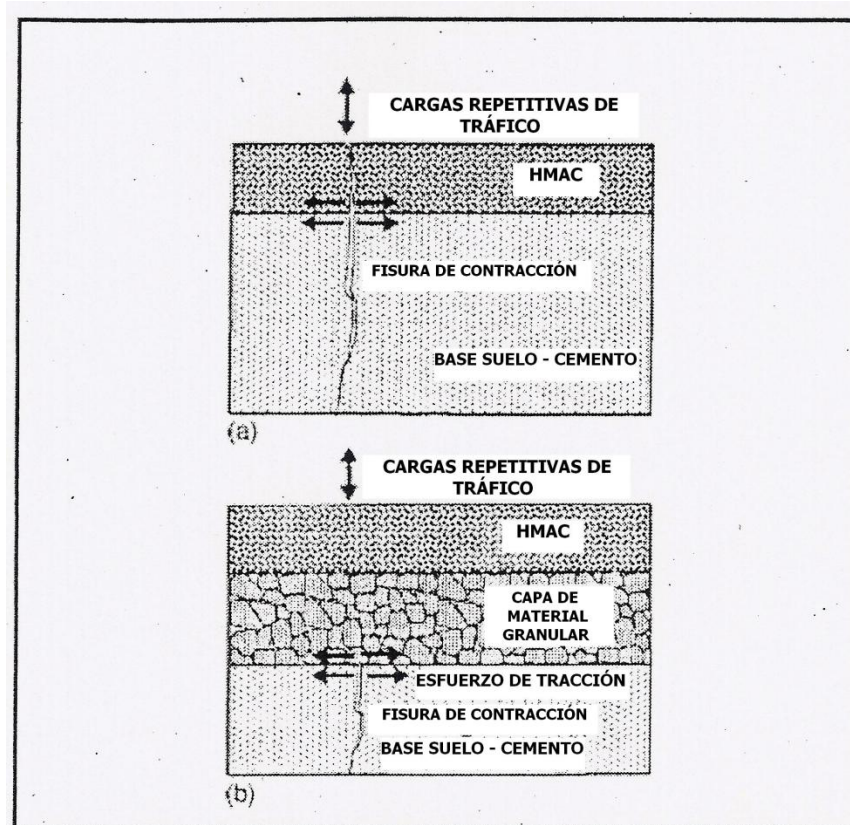
3.2.2.5. Estructuras Inversas

Es un mecanismo utilizado en la construcción de pavimentos semi-rígidos. Se basa en la colocación de una capa de materiales granulares naturales o triturados entre la base estabilizada con cemento y la capa bituminosa. La función de la capa de materiales granulares, es separar la base de la capa de superficie evitando o retardando la reflexión de las fisuras²⁹.

²⁸ Vásquez Torres, L. C.; Vásquez Varela, L. R.; Refuerzos Granulares: Modelación Y Seguimiento Del Comportamiento De Un Tramo De La Vía Estación Uribe – Tres Puertas Del Departamento De Caldas.

²⁹ Titi, H., Rasoulia, M., Martínez, M., Becnel, B. Y Keel, G.; Long-Term Performance Of Stone Interlayer Pavement; 2003.

Figura 3.27. Estructura de un pavimento semi-rígido convencional (a) y uno inverso (b)



Fuente: Titi, H., Rasouljan, M., Martínez, M., Becnel, B. Y Keel, G.; Long-Term Performance Of Stone Interlayer Pavement; 2003.

Una vez se haya seleccionado la capa de interposición que se adapte mejor a las particularidades del pavimento en deterioro y cumpla adecuadamente con las solicitaciones, se debe escoger el mejor método para fijar o adherir la capa de interposición entre el pavimento antiguo y la capa de superficie. Los métodos fijos varían según el sistema de interposición a utilizar. Se tiene por ejemplo que para los geotextiles es necesario aplicar una capa ligante como el betún con el fin de conseguir una buena adherencia; para mallas metálicas se usa un sistema que permita anclarlas a la capa subyacente o en los casos de rejillas se recurre al uso

de emulsiones. También existen algunos productos de interposiciones que son adhesivos y no requieren del empleo de un sistema de fijación.

3.2.3. Capa de Rodamiento

La capa de rodamiento desempeña también un papel importante para la resistencia contra el aumento de fisura en las estructuras de carreteras³⁰:

- Influencia del grosor de la capa: El aumento del grosor de esta capa constituye un buen método para retrasar el aumento rápido de las fisuras hacia la superficie, ya que el trayecto que debe recorrer la fisura para llegar a la parte superior de la capa se vuelve más largo. En el caso de las estructuras semi-rígidas, un gran espesor permitirá también desempeñar el papel de una pantalla térmica y en consecuencia limitará los movimientos de la capa básica tratada.
- Influencia de la composición en el comportamiento de la capa: La resistencia a la fisura de la capa de rodamiento depende también de la naturaleza de los agregados y de la naturaleza y las características del concreto y las emulsiones asfálticas. Los agregados desempeñan su papel a través del coeficiente de dilatación térmico y la calidad de adherencia.
- Adición de fibras: Permite desarrollar mezclas modificadas, como por ejemplo mezclas a base de betún, obteniendo mayores resistencias a la fisuración por fatiga que sufre el pavimento.

La modificación de las mezclas de las capas superficiales, es una técnica muy utilizada para la rehabilitación del pavimento y posteriormente como refuerzo.

³⁰ Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration; 2002.

Investigaciones recientes han permitido encontrar que una gama de productos como el betún, polímeros, entre otros, se pueden entremezclar para obtener capas con mayores resistencias ante la presencia del fenómeno de la reflexión.

3.2.3.1. *Mezclas asfálticas modificadas con betún con alto contenido de caucho*

La mezcla asfáltica se modifica adicionando betún con alto contenido de caucho que puede provenir del reciclaje de neumáticos fuera de uso (NFU). Esta alteración permite que las mezclas tengan las siguientes características:

- Buenos niveles de cohesión interna.
- Tener un comportamiento elástico muy acentuado.
- Buena adhesividad a los áridos.
- Baja susceptibilidad térmica.

El polvo de caucho se obtiene de la trituración de los NFU. Su incorporación a la mezcla bituminosa se puede realizar por vía húmeda en la cual se realiza una mezcla previa del polvo de caucho con el betún, para usarla como ligante en la mezcla bituminosa. Una segunda opción es la vía seca, que consiste en introducir el polvo de caucho directamente en el mezclador de la central de fabricación de mezclas bituminosas, junto con el betún y los áridos; el porcentaje de ligante que pueden llegar a contener está entre el 8 y el 10% sobre el peso de los áridos.

Principalmente, esta adición de betún con alto contenido de caucho, le confiere a la mezcla bituminosa una resistencia excelente a las deformaciones plásticas y una resistencia a la reflexión de fisuras mayor que en las mezclas bituminosas tradicionales.

Figura 3.28. Proceso de rehabilitación de una vía urbana en Salamanca con mezcla asfáltica modificada con betún



Figura 3.29. Vía urbana en Salamanca después del procedimiento de reparación



Fuente: Asfaltómeros; <http://www.asfaltomeros.com/>

3.2.3.2. Mezclas asfálticas modificadas con polímeros

Se agregan polímeros a las mezclas asfálticas convencionales con el objetivo de aumentar sus características mecánicas, es decir, su resistencia a las deformaciones debidas a las variaciones térmicas y a las cargas elevadas de tráfico.

Los objetivos que se persiguen con la modificación de los asfaltos con polímeros son:

- Contar con ligantes más viscosos a temperaturas elevadas para reducir las deformaciones permanentes, de las mezclas que componen la superficie de rodamiento, aumentando la rigidez.
- Disminuir el fisuramiento por efecto térmico a bajas temperaturas y por fatiga, aumentando su elasticidad.
- Contar con un ligante de mejores características adhesivas.

Básicamente, estas mezclas modificadas con polímeros, tienen la capacidad de absorber movimientos horizontales producidos por fisuras de varios milímetros, manteniendo las propiedades elásticas de las mezclas en un amplio rango de temperaturas y posibilita utilizar capas asfálticas más delgadas.

La Tabla 3.3. presenta un cuadro resumen de la aplicación a escala real de algunos de los métodos mencionados anteriormente, en diferentes partes del mundo, con una pequeña descripción de los resultados obtenidos en el control del fenómeno de la reflexión de fisuras:

Tabla 3.3. Cuadro resumen de pruebas realizadas a escala real

PRUEBAS REALIZADAS A ESCALA REAL DE SISTEMAS ANTI-REFLEJO DE FISURAS			
MÉTODO	LUGAR	PRUEBA	RESULTADOS
MALLA DE FIBRA DE VIDRIO	Lumberton, Texas, USA	Se usó sobre la autopista 96, cubriendo una milla de la peor parte afectada debajo de una capa de HMC de 1 pulgada y siendo monitoreado durante 6 años junto con unos tramos sin el producto.	Se hizo la comparación según el porcentaje de área afectada en la capa superior mostrando una evidente mejora al usar la malla tanto en fisuras longitudinales como transversales.
MALLA DE FIBRA DE VIDRIO	Hammond, Louisiana, USA	Se usó sobre la autopista 190, que se vio bastante afectada por una desviación de tráfico; dejando una sección de control sin el producto para ser monitoreada.	Al igual que en la anterior experiencia, la malla logró retardar notablemente la generación de las fisuras en la capa nueva en más de un 50% de área afectada.
GEOSINTÉTICOS	McAllen, Texas, USA	Fue puesta una capa de geosintético sobre un solo carril de 12 pies en una vía de 5 a modo de prueba bajo una capa de 1.5 pulgadas de asfalto. Se usaron diferentes tipos de geosintéticos en las distintas zonas demarcadas por un acotamiento de la vía, incluyendo una donde solo engrosaron la capa superior y otra con malla de fibra de vidrio.	Se demostró nuevamente que un pavimento sin sistema antirreflejo se agrieta mucho más rápido que cuando se le hace algún tratamiento, incluso un engrosamiento de la capa. La malla de fibra de vidrio ofreció los segundos mejores resultados detrás de un producto llamado StarGrid GP+F.
MEZCLA	Calatrava,	Se usó en una importante vía del lugar a	Presentó buenos resultados en los

ASFÁLTICA MODIFICADA	Ciudad Real, España	modo de sistema antirreflejo de fisuras usando fibras en la capa modificada con un betún caucho BM-3a marca ASEFMA.	siguientes meses de prueba tanto en campo como en laboratorio sometido a un ensayo de pista (NLT 173).
MALLAS	Güigüe, Carabobo, Venezuela	Se realizó un recubrimiento con una geomalla de poliéster sobre la mitad de la calzada en un tramo de 50m sobre la troncal 11 revestida finalmente por una capa de 5cm de concreto asfáltico para ser monitoreada durante un año. La otra mitad de la calzada se dejó sin capa de interposición pero se usaron 10cm de concreto asfáltico.	En la mitad con geomalla se empezaron a notar pequeñas fisuras luego de aproximadamente 10 semana de ser puesta, pero en la parte sin protección fue prácticamente instantáneo. En general se evidenció un mejoramiento en la rata de fisuración de casi dos veces gracias a la utilización de la geomalla.
INTERCAPA GRANULAR	Caldas, Colombia	Fue probada una intercapa granular de refuerzo de 15 cm bajo una capa de concreto asfáltico de 7.5 cm en dos tramos de la vía Estación Uribe – Tres Puertas, de manera que se tomaron medidas de deflexiones promedio para finalmente realizar una modelación mecanicista para caracterizar el comportamiento mecánico de la capa.	A pesar de que el pavimento existente estaba en un estado considerable de degradación se le hicieron los respectivos tratamientos y con la intercapa granular se obtuvo una disminución en las deformaciones de casi el 50%, resultado esperado por los analistas. La construcción de las intercapas fue realizada entre los años 1987 a 1989 y fue inspeccionada en el 2002 para corroborar que los resultados fueron los esperados.

4. EXPERIMENTACIONES EN EL LABORATORIO

El fenómeno de la reflexión de fisuras ha sido estudiado por diversos autores, mediante ensayos de laboratorio y de campo que buscan simular las condiciones reales que soportan los pavimentos asfálticos y los sistemas antirreflexión de fisuras. A continuación se hará una descripción de cada una de las pruebas encontradas en la bibliografía consultada.

4.1. PRUEBAS EN EL LABORATORIO

Los ensayos de laboratorio descritos a continuación se encuentran clasificados en función de su grado de complejidad:

- Pruebas de fatiga por cizallamiento.
- Pruebas que simulan el comportamiento de la capa de superficie bajo cargas de tráfico.
- Pruebas que simulan el comportamiento de la capa de superficie bajo la acción de variaciones térmicas.
- Pruebas que simulan el comportamiento simultaneo de las cargas de tráfico y las fuerzas de variación térmica.
- Pruebas complementarias.

4.1.1. Pruebas de fatiga por cizallamiento

Distintas pruebas de laboratorio se han diseñado para estudiar la fatiga por cizallamiento en las mezclas bituminosas, entre las que se encuentran: la prueba de cizallamiento desarrollada por la universidad de DEFLT (Laveissiere), prueba de cizallamiento RCD (Reflective cracking device) (Laveissiere;Pérez), Banco de fatiga por cizallamiento de MEFISTO (Laveissiere;Pérez) Maquina de prueba de cizallamiento (Laveissiere), Banco de fatiga por cizallamiento del laboratorio 3MSGC (Laveissiere;Pérez), las cuales se explicarán a continuación.

4.1.1.1. Prueba de cizallamiento DEFLT³¹

La Universidad de Delft utiliza su propio equipo de fisura en fatiga; este dispositivo se desarrolló principalmente para estudiar los fenómenos de engranaje³² a nivel de una fisura. La ventaja de este sistema se basa en la utilización de una probeta con una forma relativamente simple: barra prismática o pequeña viga, cuyas dimensiones son: 110 x 125 x 450 mm³.

De esta manera, la probeta puede fabricarse en el laboratorio, o también proceder sobre una muestra tomada directamente sobre una estructura real. El principio de la prueba se representa en la Figura 4.1. La probeta se basa en un armazón fijo en la parte baja sobre dos pivotes, un gato hidráulico vertical permite imponer a la probeta un esfuerzo de cizallamiento transmitido por otros dos pivotes. Esta posición permite aplicar una tensión de cizallamiento puro. El gato horizontal

³¹ De Bondt, A. Y Scarpas, A.; Reflective Cracking,Control Via Stress-Relieving Systems; 1996. Citado Por: Prieto Muñoz, J., N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficiencia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

³² Contacto heterogéneo que continua creando un cierto nivel de resistencia residual en un material fisurado a través de sus partículas granulares que quedan atrapadas en un sistema de tipo "engranaje" [Delphine Laveissiere]

ejerce una presión sobre la zona solicitada (junta o engranaje en la propagación de fisura).

Figura 4.1. Máquina de fisuración en fatiga de Delft y probeta utilizada



Fuente: Alimami, M; Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux; 1988. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Inicialmente esta prueba se desarrolló para estudiar el comportamiento de la resistencia o el engranaje de un interfaz. Esta configuración permite simular esfuerzos de cizallamiento, transmitiendo a la interfaz un esfuerzo de 11/15 veces el esfuerzo vertical total. Además, un pistón hidráulico horizontal permite generar esfuerzos de compresión en la zona solicitada.

4.1.1.2. Cizallamiento RCD (Reflective Cracking Device)³³

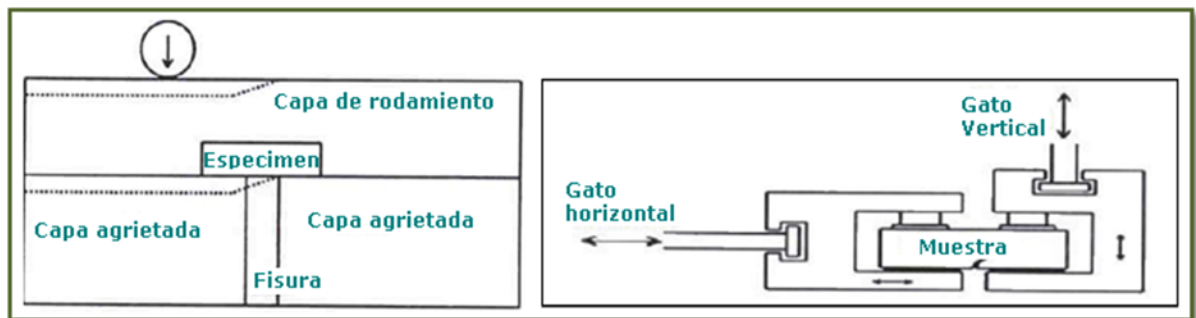
Esta prueba fue desarrollada a raíz de la observación de la falta de correlación existente entre las pruebas de flexión en fatiga y el aumento de fisura sobre

³³ Sousa J.B., Pais J.C. & Stubstad R.N.; Mode of loading in reflective and flexural fatigue cracking – A Numeric Evaluation; 2000. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie; 2000.

calzada real. Sousa y AL (2002) reconocieron la necesidad de tener un dispositivo experimental que permitiera simular el método de tensión realista en laboratorio, por lo cual desarrollaron la prueba de cizallamiento en laboratorio.

La Figura 4.2. presenta el dispositivo experimental desarrollado en el marco del SHRP³⁴ para una predicción del método de fisura reflexiva. Se trata del RCD (Dispositivo de reflexión de fisuras). Esta prueba permite combinar independientemente la tensión en método de abertura (Modo I) y en cizallamiento (Modo II), y controlar indistintamente en esfuerzo o en desplazamiento.

Figura 4.2. Representación diagramática de la prueba de RCD (Reflective Cracking Device)



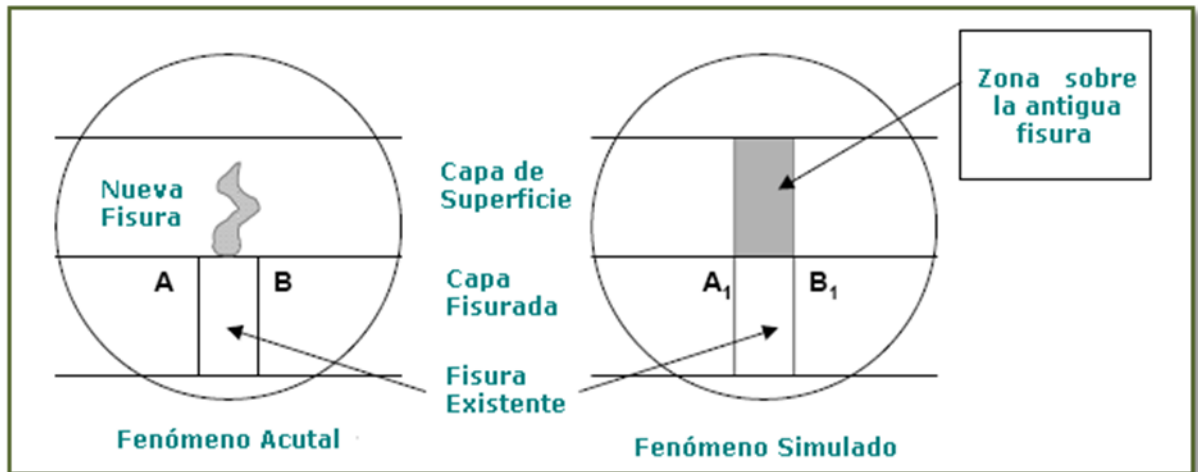
Fuente: Pais, J.C. & Pereira, P.; Evaluation of reflective cracking resistance in bituminous Mixtures; 2000. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

De forma paralela una serie de ensayos experimentales realizaron algunas simulaciones con elementos finitos con el fin de determinar qué tipo de tensión representa la mejor configuración real durante el proceso de propagación, es decir, en este análisis numérico, el desplazamiento relativo entre los puntos A y B

³⁴ Sousa, J. B., Shatnawi, S. Y Cox, J.; An Approach For Investigating Reflective Fatigue Cracking In Asphalt-Aggregate Overlays; 1996.

en la propagación de fisura será el mismo el desplazamiento relativo entre los puntos A1 y B1, como se muestra la Figura 4.3.

Figura 4.3. Modelación idealizada del comportamiento de la fisura



Fuente: Pais, J.C. & Pereira, P.; Evaluation of reflective cracking resistance in bituminous Mixtures; 2000. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Durante la prueba, la fisura se propaga, y el desplazamiento relativo entra A y B aumenta. El módulo equivalente de la zona degradada disminuye, provocando el aumento de los daños.

Los cálculos realizados, en función del módulo de la junta equivalente y el aumento de la altura agrietada, ponen en conocimiento que en una estructura de carreteras, la dificultad que evoluciona menos es la dificultad de cizallamiento.

La modelación permite concluir que las pruebas realizadas con esfuerzos controlados, aplicando una combinación de esfuerzos de cizallamiento y tracción, son los más representativos. Además, las pruebas controladas en esfuerzos

permiten una comparación de los resultados de distintas soluciones, siendo el criterio de deterioro una caída del 50% del módulo.

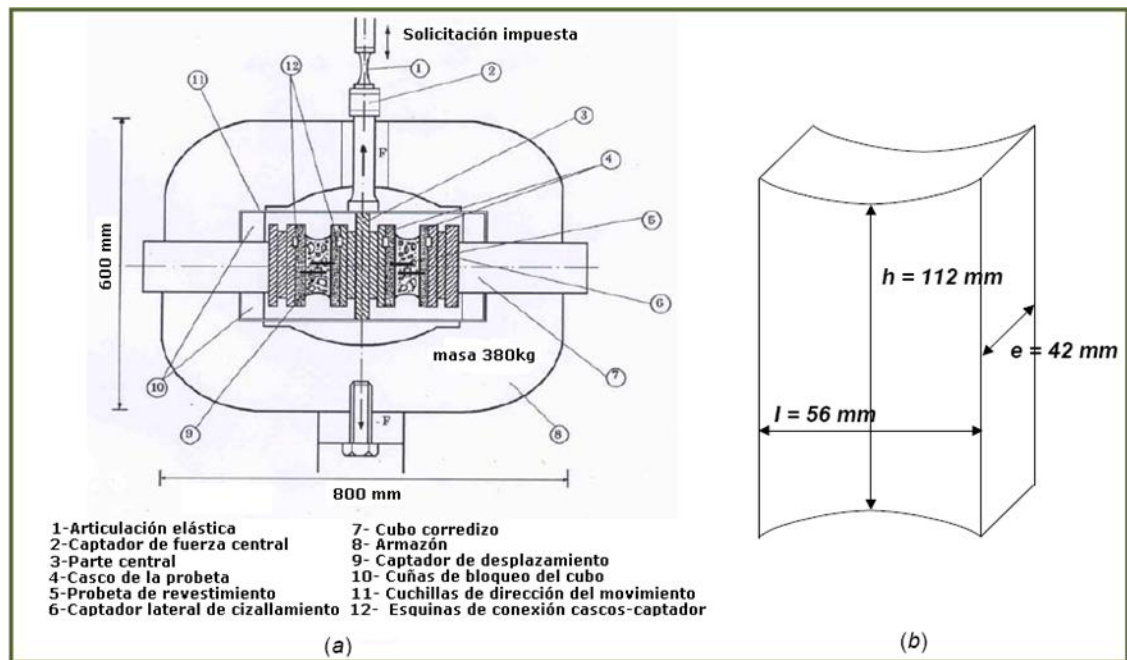
4.1.1.3. *Máquina de prueba por cizallamiento*³⁵

Con el fin de tener una prueba que estudiara el comportamiento de las capas bituminosas a la fatiga por cizallamiento en laboratorio, fue diseñada la máquina de prueba por cizallamiento.

Las probetas tienen forma de diábolo (Figura 4.4), y sus dimensiones permiten tener una muestra representativa. El objetivo de esta prueba a corto plazo es caracterizar el aumento de la fisura en las estructuras de pavimentos, pero a largo plazo su objetivo es ofrecer una alternativa de realizar ensayos de flexión de tres puntos sobre una probeta trapezoidal definiendo una ley de comportamiento homogénea.

³⁵ Alimami, M; Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux; 1988. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie;1988.

Figura 4.4. (a), Descripción del armazón de soporte de la probeta (b), dimensiones de la probeta



Fuente: Alimami, M; Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux; 1988. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Esta prueba se caracteriza, por presentar una disminución de la dureza de la probeta, durante su ensayo. Según Alimami (1988), autor de éste estudio, se evidencio que una parte de la pérdida de la dureza de la probeta durante una prueba bajo solicitaciones continuas sinusoidales, es derivada de los efectos de calentamiento propios de este tipo de pruebas.

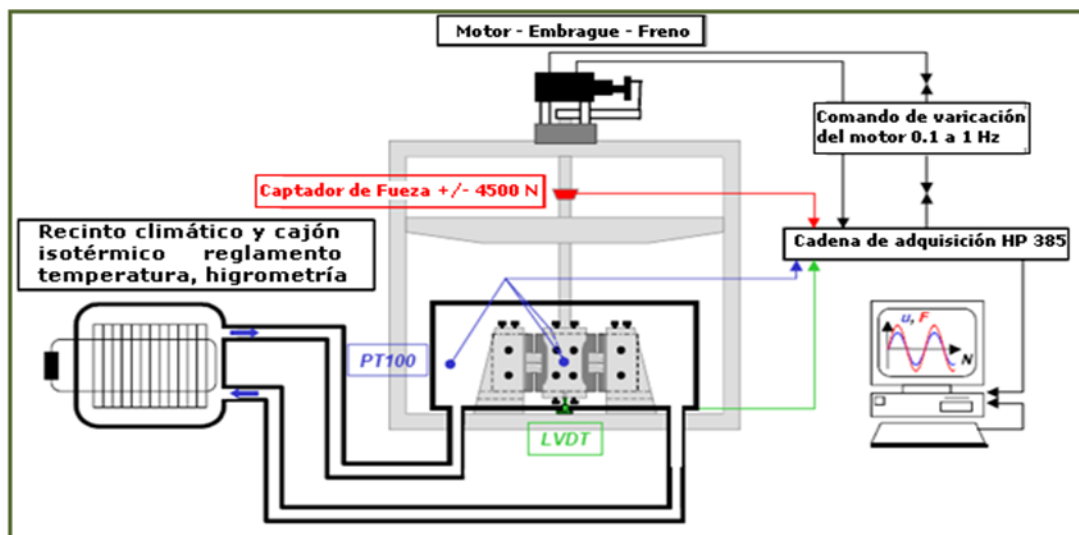
Con el fin de liberarse de dicho fenómeno de calentamiento, se creó un procedimiento de sollicitación por impulsión seguido de un periodo de descanso.

Así pues, la identificación de una ley de evolución del daño, más realista y mejor adaptado a las sollicitaciones de un revestimiento sobre una calzada parece una buena alternativa al enfoque actual por la mecánica de la ruptura.

4.1.1.4. Prueba de fatiga por cizallamiento del laboratorio 3MSGC de Egletons³⁶

El laboratorio 3MSGC de Egletons, cuenta con un banco de fatiga que permite realizar estudios de la propagación de la fisura por el método de cizallamiento (modo II), el cual se asocia directamente a los fenómenos de la fisura reflexiva de las calzadas semi-rígidas o flexibles con capas refuerzo (Figura 4.5.). Para modelar este fenómeno, se realizó la prueba por cizallamiento cíclica alternada sobre probetas cortadas, de tipo CS (Compact Shearing) modificado (Figura 4.6.).

Figura 4.5. Banco de fatiga por cizallamiento del laboratorio 3MSGC

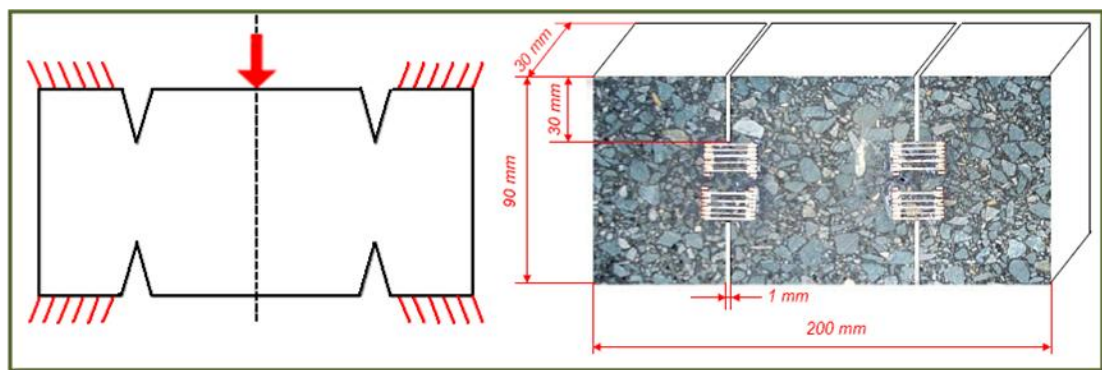


Fuente: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

³⁶ Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration; 2002.

La prueba comienza con la preparación previa de la probeta, esta etapa es esencial para la prueba, ya que esta garantiza el buen desarrollo del experimento. Se escogió una probeta C.S. modificada, debido que el hormigón bituminoso no cuenta con una dirección definida de la propagación de la fisura, esta geometría permite minimizar la aparición de un componente parásito del método de abertura que se hace presente en la realización de la prueba por cizallamiento (Figura 4.6.).

Figura 4.6. Geometría de la Probeta C.S. modificada



Fuente: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

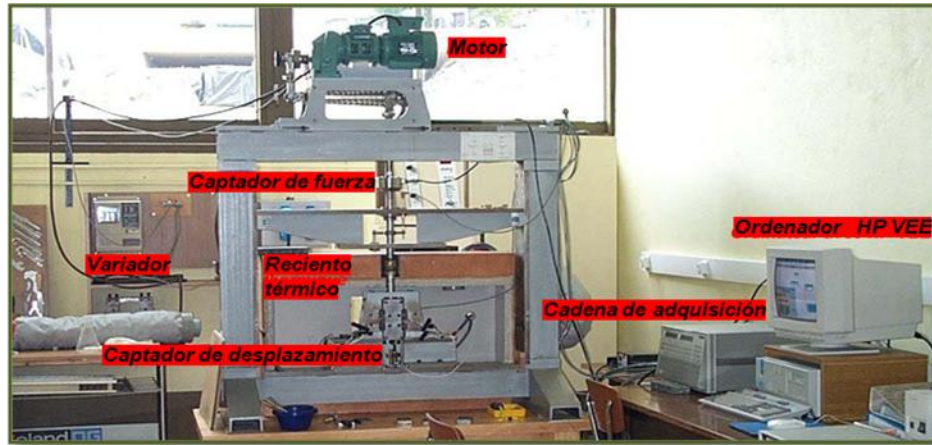
El montaje de la probeta se realiza a temperatura ambiente. Esta es la fase que requiere de más atención ya que condicionará la tensión real aplicada a la probeta. Otras condiciones deben cumplirse a fin de garantizar el buen desarrollo de la prueba como los son: el centrado de la probeta en el sentido longitudinal para garantizar que las muescas queden centradas con relación al eje de aplicación de la tensión; el centrado de la probeta en el sentido vertical evitando introducir un momento indeseado en la sujeción; el centrado de la probeta en el sentido de la altura, con el fin de solicitar la probeta en su parte central de manera alternada y simétrica.

La probeta se coloca en un armazón cuyos dos apoyos laterales se encajan y la parte central se fija en el eje móvil de la máquina de prueba electromecánica llamada COLAREG. La probeta presenta dos muescas por una y otra parte el eje móvil de alrededor de 30 mm con el fin de inducir una tensión de cizallamiento simétrico alternado (Figura 4.6.). La fisura de fatiga por cizallamiento se propaga de manera orientada por los planos guiados por las pre-muecas.

La prueba es instrumentada a fin de reportar los valores de los esfuerzos y desplazamientos de la parte central de la probeta, de los valores de temperatura y los valores de propagación de la fisura cerca de las muescas en intervalos de tiempo (Figura 4.7.). Los esfuerzos son medidos por un captador de fuerza SENSOTEC con un rango de medida de +/- 4500 N con una precisión de +/- 0.1% colocado sobre el armazón central (Figura 4.8.); los desplazamientos por captadores de tipo LVDT bajo la probeta cuyo curso es de +/- 10 mm, una precisión de +/- 0.1% y un desfase inferior a 1° para 100 Hz (Figura 4.9.), la temperatura por termopares o sondas PT100 con una precisión superior a 1/10 de °C (Figura 4.10.) y la propagación de la fisura es medida por resistencias de hilos conductores colocados en los accesos de las cuatro muescas (Figura 4.6). Con el fin de tener un seguimiento visual se aplica una pintura blanca en la cara posterior de la probeta, que permite seguir de manera visual la propagación de la fisura.

Las elecciones de los parámetros experimentales y las dimensiones de las probetas se determinan en función de la capacidad de la máquina. La frecuencia máxima que puede ser entregada por el banco de fatiga por cizallamiento, COLAREG, es de 6Hz y la temperatura puede estar en un rango entre 60°C y -25°C.

Figura 4.7. Banco experimental y sistema de medida y de adquisición



Fuente: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Figura 4.8. Captador de fuerza

Figura 4.9. Captador de desplazamientos

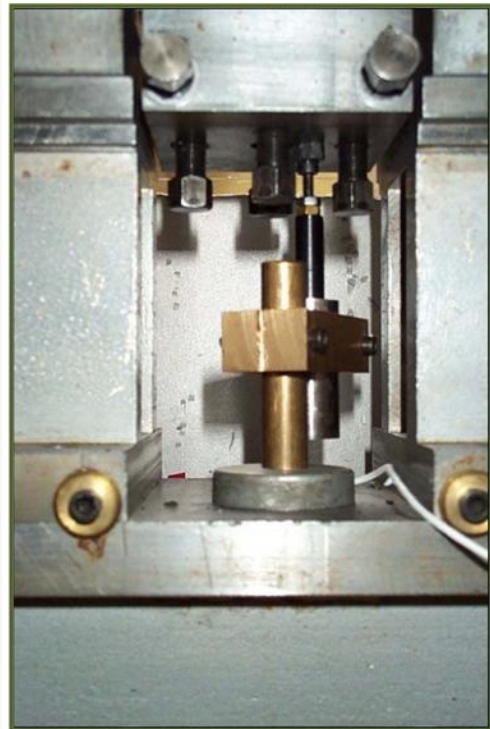
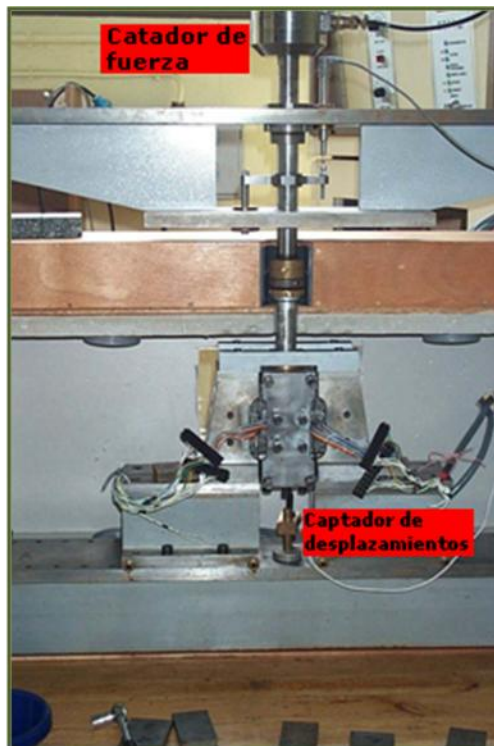
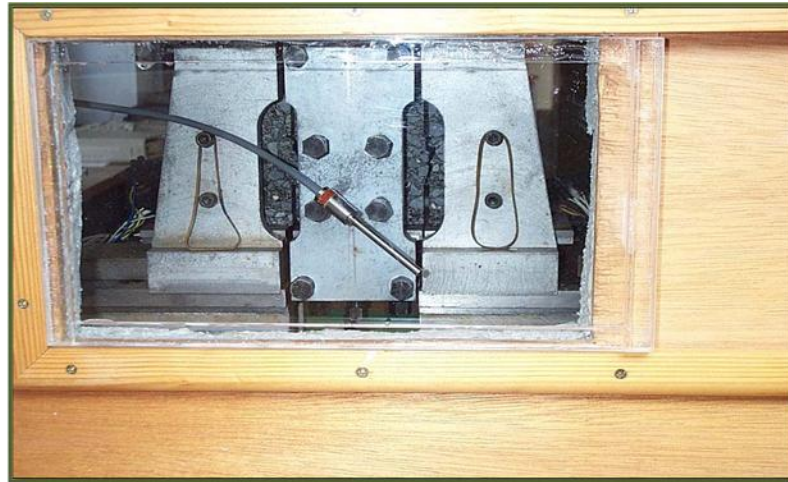


Figura 4.10. Sonda térmica instalada sobre la cara posterior de la probeta (agrietada)



Fuente: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Con el fin de realizar pruebas que se acerquen a las condiciones reales, se adoptó una frecuencia de 1Hz, la cual se asemeja a las tensiones debidas al tráfico. La temperatura escogida para la prueba fue de 5 °C; por consiguiente esta combinación de la frecuencia elegida (1 Hz) y la temperatura (a 5°C) permite probar los materiales bituminosos en su ámbito elástico asignándoles al mismo tiempo una determinada fragilidad. El comportamiento frágil a la ruptura se desea en este tipo de prueba con el fin de reproducir correctamente la fisura reflexiva. Este par de valores de frecuencia y temperatura elegidos permiten a la vez probar las probetas en función de la capacidad de la máquina.

Las tensiones impuestas en la prueba de fatiga por cizallamiento no son ni a desplazamiento, ni a esfuerzo controlado. Este inconveniente se transformó finalmente en ventaja, pues las tensiones impuestas de esfuerzos por cizallamiento son de tipo constante en la fase de agrupamiento, de propagación

estable de la fisura y una energía de deformación elástica linealmente creciente al curso ciclos.

Esta serie de ensayos experimentales de pruebas de fisura reflexiva de fatiga por cizallamiento proporcionaron dos resultados interesantes:

- En primera instancia, la Ley de Propagación de fisuras planteada por París, en el método de cizallamiento, consigue resultados físicamente no realistas (pendiente negativa);
- En segunda instancia, se propuso una ley de evolución de la rigidez en el cordón resistente de hormigón bituminoso, permitiendo el estudio del agrupamiento y de la propagación.

El marco de esta modelación se basó en el código de cálculo CAST3M. Se realizaron simulaciones de dos tipos de estructuras con ayuda de dicho código, una estructura semi-rígida y una estructura bituminosa fisurada en la base de la capa de refuerzo. La carga aplicada, con una presión de 0,67 MPa sobre una anchura de 25cm, corresponde al eje de 130 KN en una simulación 2D bajo la hipótesis de deformación plana y su posición sobre el estructura se eligió donde el cizallamiento sea máximo en la capa de superficie.

En el caso de las estructuras semi-rígidas, las simulaciones efectuadas permitieron confirmar, que las capas básicas se agrietan, y que el estado de esfuerzo de los bordes de la fisura en la capa de superficie es la compresión. Además de encontrar estimaciones del tiempo de propagación de la fisura.

De otra parte, en el caso de las simulaciones de propagación de la fisura en calzadas de hormigón bituminoso bajo cargas de tráfico, el tiempo de ruptura de la duración de vida de la estructura se ha sobreestimado. Debido a que los efectos

de la temperatura sobre el comportamiento del hormigón bituminoso y la abertura de la fisura, no son tenidos en cuenta en estas simulaciones, las duraciones de vida fueron superiores a las duraciones reales; por lo tanto la consideración de la temperatura y el tráfico puede permitir conseguir resultados de duración de vida más cortos que serían más realistas.

4.1.2. Pruebas de laboratorio para la simulación del comportamiento de la capa de superficie bajo cargamento repetido (tráfico y/o térmico)

4.1.2.1. Simulación del tráfico

4.1.2.1.1. Prueba de viga en flexión con carga dinámica

Es una de las pruebas más utilizadas y consiste en ensayar una estructura que representa la capa de superficie sobre una base flexible agrietada por medio de una viga apoyada sobre una base flexible o rodillos (Figura 4.11.). La carga cíclica se aplica sobre la superficie para poder simular los métodos I y II de movimiento, apertura y cizallamiento respectivamente, en función del número de ciclos poder determinar el camino de la fisura.

La experiencia con ésta prueba ha llevado a formular varias conclusiones, como que la utilización de betún modificado sobre los geotextiles no tejidos, o SAMI, es un método mucho más efectivo para lidiar con el aumento de fisura que con el betún únicamente³⁷.

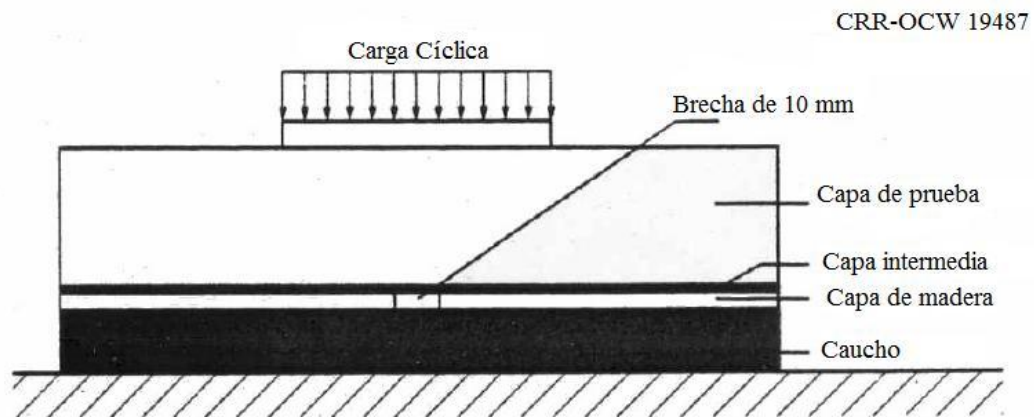
Con esta prueba se pueden determinar los valores de deflexión vertical máxima en función del número de ciclos de carga al igual que la resistencia al cizallamiento

³⁷ Rigo, J. M.; General Introduction, Main Conclusions Of The 1989 Conference Of Reflective Cracking In Pavements And Future Prospects; 1993.

del interfaz bajo la acción del frenado de los vehículos [BUT82] con el fin de conocer la capacidad del refuerzo para una estructura.

Sólo existe un problema con la formulación de la prueba y es que la parte baja de la estructura representa una consideración en la reacción de la misma.

Figura 4.11. Representación de la prueba de viga en flexión con carga dinámica (RIG93)



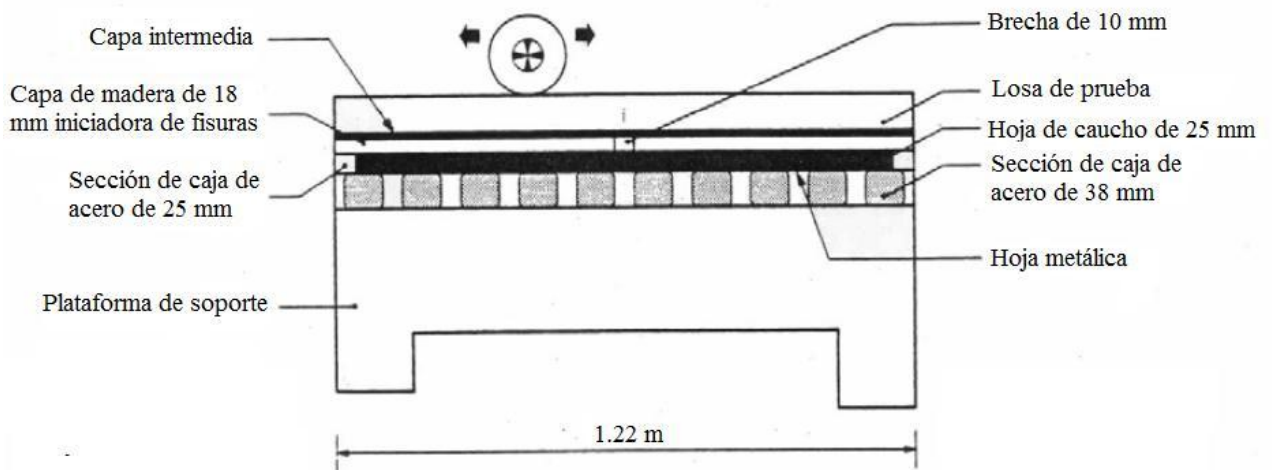
Fuente: Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement El Macro-Fissuration.

4.1.2.1.2. Prueba con paso real de una carga rodante

La prueba consiste en someter una placa o viga, que representa la estructura en estudio, a la acción de una carga rodante real de manera tal que se pueden utilizar muestras de mayor tamaño que en las anteriores pruebas mencionadas y además tener una relación más estrecha con las condiciones reales de la estructura (Figura 4.12.).

Expertos indican que tiene el mismo problema que la prueba de viga en flexión con carga dinámica y es que la parte baja del montaje representa cambios en la capacidad de reacción de la estructura.

Figura 4.12. Representación de la prueba con paso real de una carga rodante (BRO93)



Fuente: Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement El Macro-Fissuration.

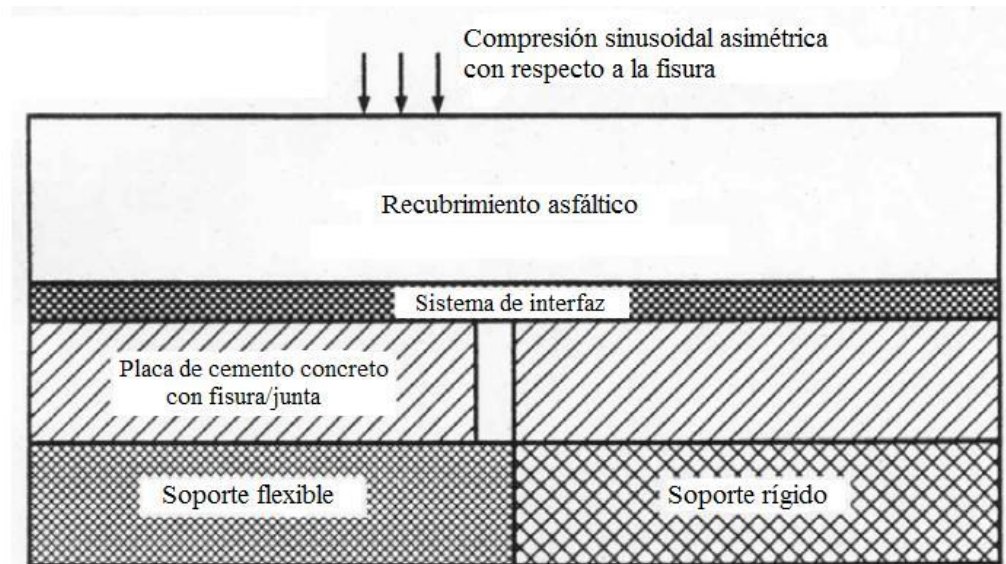
4.1.2.1.3. Prueba del comportamiento del revestimiento en el caso de recarga de losas Vanelstraete

Fue desarrollada por el Centro de Investigación De carreteras Belga con el fin de poner en evidencia el comportamiento de la capa de superficie en el caso de una recarga de losas de hormigón que presentan movimientos verticales de amplias amplitudes (Figura 4.13.).

El fin de esta prueba es comparar la eficiencia de los distintos métodos para prevenir los movimientos verticales de las losas pero teniendo en su contra el

complicado tratamiento que se le debe dar a la capa de superficie para simular de manera correcta el funcionamiento en campo.

Figura 4.13. Representación de la prueba del comportamiento del revestimiento en el caso de recarga de losas Vanelstraete



Fuente: Delphine Laveissiere; Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration.

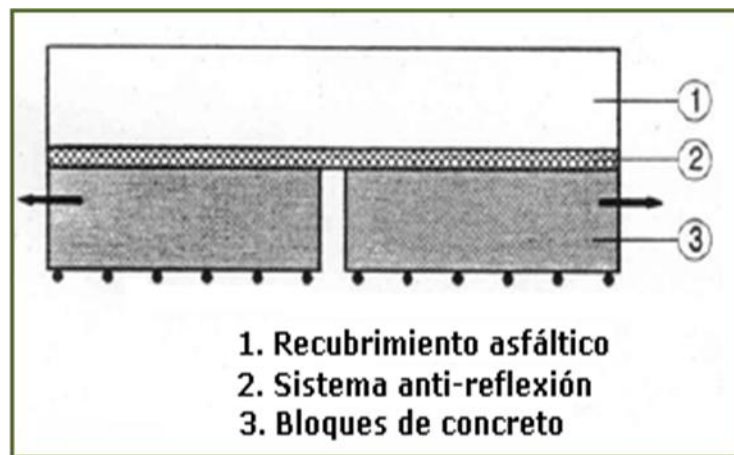
4.1.2.2. Simulación de las variaciones térmicas

Las variaciones térmicas pueden representar el origen de deformaciones y desplazamientos en los bordes de las fisuras existentes. El objetivo de los distintos dispositivos creados consiste en aplicar fuerzas horizontales con el fin de simular los efectos causados por los movimientos (apertura y cierre) de las losas o bloques de la capa agrietada.

4.1.2.2.1. Prueba de simulación de la retracción térmica³⁸

El objetivo principal de esta prueba es probar la eficiencia de los distintos sistemas anti-reflejo de fisuras. Esta prueba ha sido tratada por varios autores Vanelstraete (1997), Francken (1993), Clauwaert (1989), la cual consiste en someter a la probeta a una serie de ciclos de abertura y cierre de la fisura en la parte inferior de la muestra; en la Figura 4.14. se puede observar el esquema de la prueba.

Figura 4.14. Esquema del sistema de ensayo que simula fuerzas térmicas



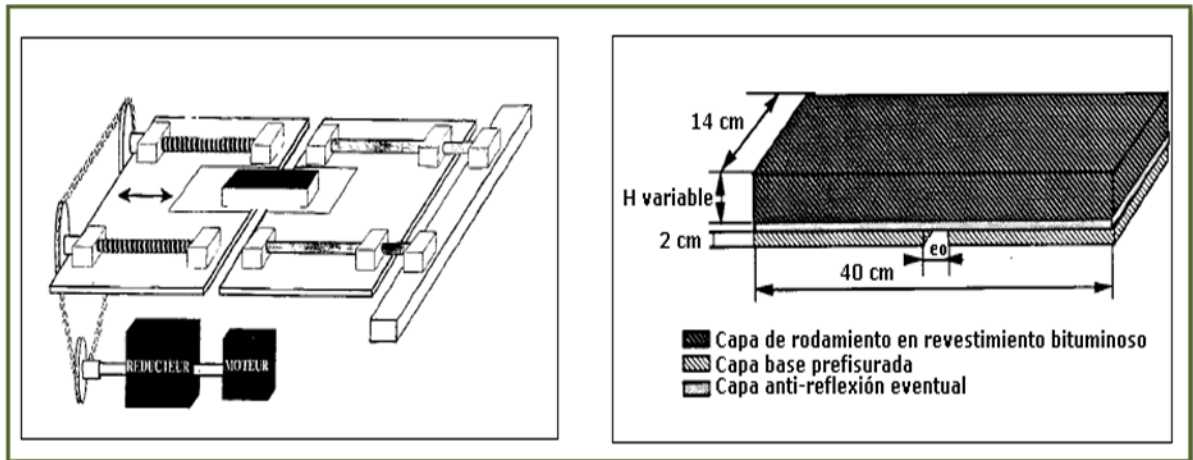
Fuente: Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems.

4.1.2.2.2. Prueba de simulación de la retracción térmica "Fisurómetro E/G"

Este dispositivo se puso en funcionamiento en conjunto con la ENTPE y la empresa Gerland. Permite estudiar el impacto de las contracciones y dilataciones térmicas a las que se someten las calzadas con capas de hormigón bituminoso cuando se presentan variaciones de temperatura. La prueba se realiza en unas condiciones de temperatura constante, con el fin de no alterar las propiedades mecánicas del material bituminoso durante la prueba (ver Figura 4.15.).

³⁸ Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems; 1997.

Figura 4.15. Esquema del “Fisurómetro E/G” y su probeta



Fuente: Prieto Muñoz, Jorge N.; Desarrollo de un nuevo ensayo de laboratorio para medir la eficiencia de sistemas antirreflexión de fisuras en capas bituminosas.

Los sistemas de medidas constan de:

- Tres captadores de desplazamiento. Se colocan de tal modo que puedan seguir el desplazamiento relativo del apoyo móvil con relación al que es fijo. Este desplazamiento corresponde a tensión impuesta.
- Dos captadores de fuerza de parte y parte de la plataforma fija miden la fuerza aplicada sobre la sección media del hormigón bituminoso y la interfaz (en la dirección de la fisura).
- Se fijan algunas capacidades de deformaciones sobre las superficies laterales, con el fin de prevenir el posible deslizamiento en el interfaz.
- Se usa un sistema ultrasonido para cuantificar la degradación de la probeta (aparición de micro-fisuras).

La prueba de la ENTPE ofrece la posibilidad de probar una muestra con o sin sistema antirreflexión de fisuras, con una frecuencia de tensión cercana de la de

variaciones térmicas reales. La altura de la probeta es un parámetro del estudio, mientras que la separación inicial de pre-fisura es fija, y es del orden de 3mm.

La amplitud de la abertura máxima entre las dos placas es variable, pero no puede excederse de 20mm; de la misma manera la velocidad de variación de las placas es ajustable y se encuentra en un rango que va desde 1,25 a 11 mm/h. La mayor parte de las pruebas se realizaron con una velocidad de desplazamiento de la placa de 2,7 mm/h y una amplitud de abertura máxima de 0,4 mm. Estos dos valores permitieron calcular la frecuencia de tensión de la probeta, la cual corresponde a $2 \times 1,8 \cdot 10^{-3}$ Hz. Comparando esta frecuencia, con la frecuencia de tensión diaria, es decir de 24 horas, los resultados son considerables obteniendo una frecuencia de $1,16 \cdot 10^{-5}$ Hz.

Los parámetros vinculados a la tensión son: la temperatura, la velocidad de abertura y cierre de la placa móvil y la amplitud de abertura.

La información otorgada por estas pruebas va de la simple observación del proceso de fisura en función del número de ciclos a medidas de propiedades más fundamentales como el módulo de cizallamiento del sistema antirreflexión o la relación de comportamiento entre el esfuerzo y la deformación. Generalmente, estas pruebas se llevan a cabo a temperaturas bajas para favorecer a la fisura, las cuales están generalmente por debajo de los -5°C .

4.1.2.2.3. Prueba para simular las fuerzas térmicas “dispositivo experimental de la prueba BRRC”³⁹

Este dispositivo experimental del Centro de Investigación de Carreteras Belga “Centre de Recherche Routière Belge BRRC”, simula los movimientos debido a las variaciones térmicas de la capa base de una calzada con capa de rodamiento en capa bituminosa.

Al igual que en la prueba anteriormente descrita, el objetivo de esta prueba es simular la abertura y cierre de la fisura (método I), en donde una parte de la capa en hormigón puede desplazarse. Cada ciclo de la prueba tiene una duración de 3 horas, a una temperatura constante de -10°C, en donde la abertura en la base de hormigón se aumenta en 1 mm y vuelve seguidamente a la abertura inicial de 4 mm.

En esta prueba el registro de la aparición y propagación de las fisuras se lleva a cabo de manera visual, mediante fotografías y registros de video. Para efectos de análisis de resultados se realiza la toma de datos de: la fuerza ejercida sobre la base de hormigón para abrir y volver a cerrar la fisura, la propagación en la capa de rodamiento, la abertura de la fisura y un posible deslizamiento de la capa de rodamiento en el soporte.

Las experimentaciones llevadas a cabo sobre este dispositivo permitieron comparar distintos sistemas retardadores de fisura o sistemas antirreflexión de fisuras, en donde se observó que uno de los más eficaces son los sistemas antirreflexión con grillas.

³⁹ Clauwaert, C. & Francken, L.; Etude et observation de la fissuration réfléctive au Centre de Recherches Routières belge; 1989. Citado por: Laveissiere, D.; “Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie; 1989.

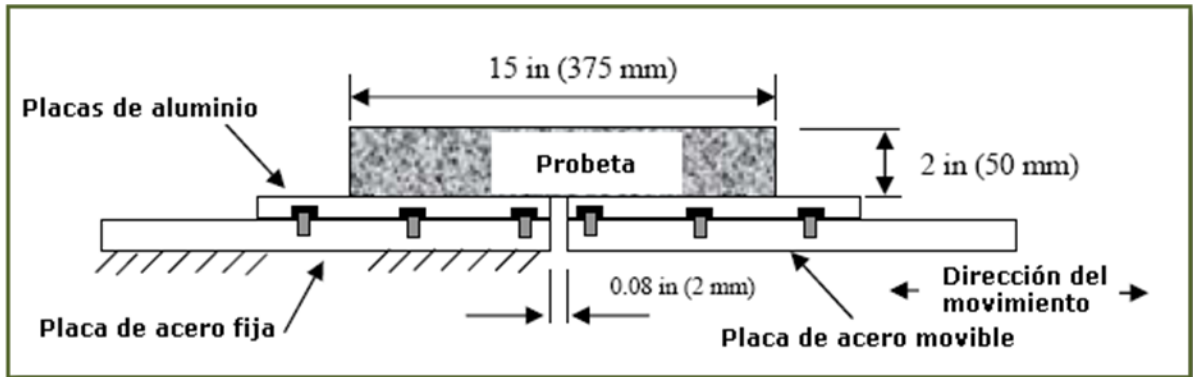
4.1.2.2.4. Prueba para simular fuerzas térmicas “UPGRADED OVERLAY TESTER” del TTI (Instituto de transporte de Texas)⁴⁰

El primer dispositivo de ensayos para estudiar la abertura y el cierre de los empalmes o de las fisuras de los recubrimientos asfálticos del TTI fue diseñado por Germann and Lytton, et Al, en los años 70. En la Figura 4.16. se pueden observar las partes fundamentales de aparato, el cual consta de dos placas de acero, una fija y otra que permite un movimiento horizontal para simular la abertura y el cierre de la fisura en los pavimentos asfálticos deteriorados en la base de la capa de refuerzo.

El TTI cuenta con dos probadores: uno para probar muestras de tamaño pequeño con dimensiones de 375 mm (15 in) de largo, 75mm (3 in) de ancho y una altura variable; el otro probador es para ensayar muestras de mayor tamaño con dimensiones de 500 mm (20 in) de largo, 150 mm (6 in) de ancho y altura variable. Ambos probadores han sido utilizados con éxito por diversos autores. El objetivo principal de esta prueba es la de evaluar la eficiencia de los geotextiles en retrasar la reflexión de las fisuras.

⁴⁰ Zhou, F., Scullion, T. Y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test; 2004.

Figura 4.16. Esquema de las primeras versiones de la prueba del TTI



Fuente: Zhou, F., Scullion, T. Y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test.

El uso de estos probadores tiene su potencial fijado en la caracterización de la resistencia de las fisuras reflexivas de las mezclas asfálticas. La utilización de probetas de gran tamaño dificultaba su fabricación en el laboratorio y aún más conseguir las en campo, por este motivo se hizo necesario desarrollar un probador más avanzado que utilice una probeta más práctica para el diseño frecuente de pavimentos.

La versión más reciente de esta prueba utiliza probetas de 150 mm (6 in) de longitud, 75 mm (3 in) de ancho y una altura que varía desde 38 mm (1.5 in) a 50 mm (2 in), estas probetas son más fáciles de fabricar e incluso de obtenerlas en campo (ver Figura 4.17.).

Figura 4.17. Dispositivo experimental desarrollado en el TTI



Fuente: Zhou, F., Scullion, T. Y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test.

Los datos de la prueba son: Tiempo, desplazamiento y fuerza, y son registrados automáticamente en un archivo de Excel, debido al uso de programas especiales para el cargamento monofásico y bifásico incorporados en la prueba.

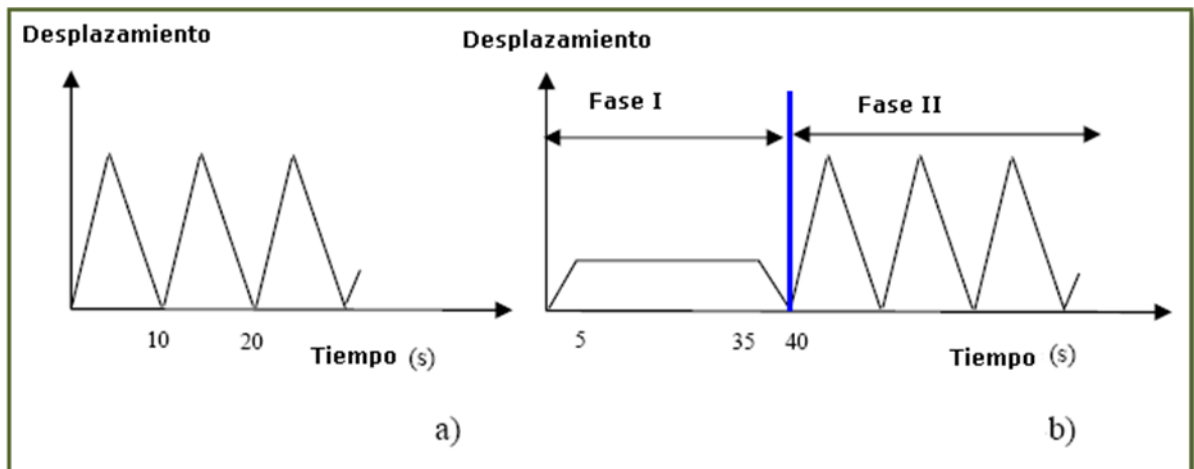
La prueba se puede realizar en el modo de desplazamientos controlados bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura: 0 - 25°C;
- Desplazamiento de la abertura: 0 - 2 milímetros (0 - 0.08 in);
- Velocidad de carga: Desde 10 segundos hasta 10 minutos (o más) por ciclo; y
- Tipo del cargamento:
 - Procedimiento A (cargamento monofásico): Este cargamento se aplica en una forma de onda triangular cíclica con un desplazamiento máximo constante, según se muestra en la Figura 4.18a. La vida de la fisura reflexiva de la mezcla de asfalto, según se discutirá más adelante, puede ser determinada

basándose en los datos de carga registrados. Las características de la fractura de la mezcla de asfalto pueden ser también evaluadas por el probador.

- Procedimiento B (cargamento bifásico): Este cargamento bifásico se diseñó para los usuarios experimentados. Según se muestra en la Figura 4.18b, la primera fase tiene una forma de onda trapezoidal que tiene un desplazamiento de la fisura de 0.18 milímetros. El probador del recubrimiento utiliza el desplazamiento medido y la carga asociada a partir de los 5 seg. hasta 35 seg. para determinar una curva del módulo de la relajación. La segunda fase es similar al procedimiento A y es donde se muestra la falla.

Figura 4.18. Diagrama esquemático de los tipos del cargamento a) y b)



Fuente: Zhou, F.; Scullion, T.; Developing An Upgraded Overlay Tester System To Characterize The Reflection Cracking Resistance Of Asphalt Concrete: Summary Report.

El procedimiento A es recomendado por los investigadores para realizar ensayos repetitivos con el fin de evaluar la resistencia de las fisuras reflexivas en la mezcla asfáltica, la prueba se realiza a una temperatura ambiente de 25 °C en el modo de desplazamiento controlado hasta alcanzar una velocidad de carga de 10 segundos por ciclo y un desplazamiento máximo de 0.64 mm. El procedimiento B fue

recomendado recientemente por Cleveland, y otros para el análisis mecánico avanzado.

Con los datos obtenidos en esta prueba se puede determinar la vida de la fisura reflexiva en la mezcla de asfalto bajo ciertas condiciones de la prueba como lo son el tiempo, el desplazamiento y el tipo de carga aplicada; la determinación de este parámetro corresponde al procedimiento A de carga, ya que por el procedimiento B se puede obtener parámetros de la fractura de la mezcla de asfalto. Dada la simplicidad del procedimiento A se tomó como objeto de esta prueba.

La vida de la fisura reflexiva de una mezcla del asfalto se define como el número de ciclos necesarios para que la fisura se propague a través de la muestra hasta llegar a la superficie bajo condiciones de prueba definidas. Este valor es un buen indicador de la resistencia de la fisura reflexiva de las mezclas del asfalto⁴¹.

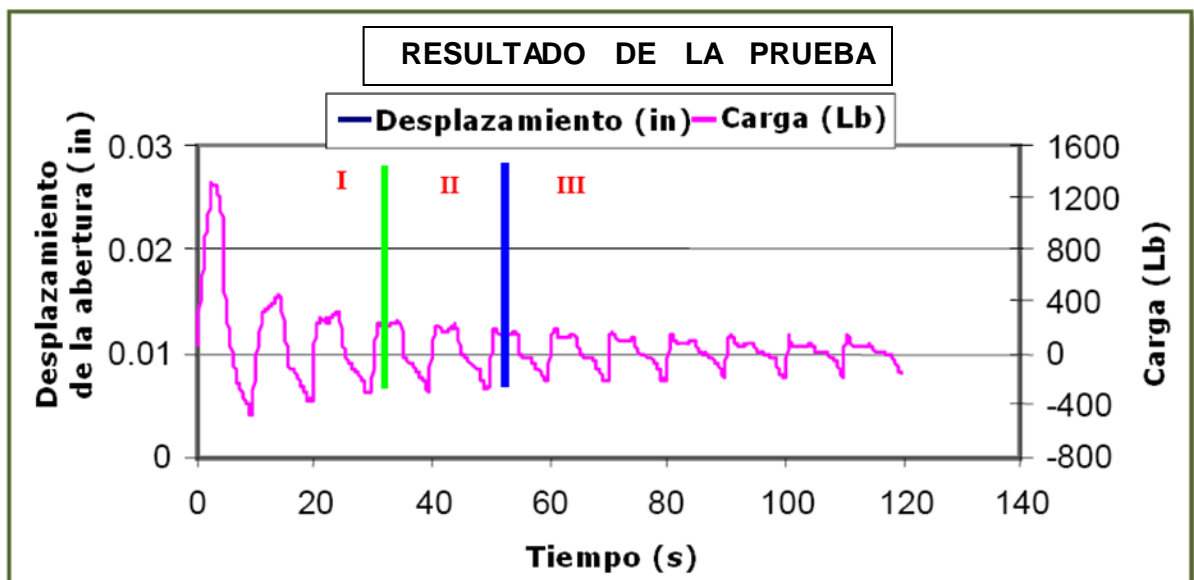
En el desarrollo de esta prueba los autores propusieron automatizar la determinación de la vida de la fisura reflexiva en un diagrama, analizando la carga y el desplazamiento para cada ciclo de abertura y cierre de la fisura contra el tiempo (ver Figura 4.19.). Después de realizar varias pruebas y analizar los resultados, se plantearon tres distintas fases en la realización de la prueba; éstas se encuentran esquematizadas en el diagrama de la Figura 4.18. Las fases son:

- Fase I: Iniciación de la fisura y propagación constante.
- Fase II: Finalización de la propagación de la fisura.
- Fase III: Falla de la muestra.

⁴¹ Zhou, F., Scullion, T. y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking simulation test; 2004.

Se han determinado una gran variedad de vidas de fisuras reflexivas con ayuda de este probador, las cuales varían desde uno o dos ciclos hasta 1500 ciclos, y se ha concluido que cuanto más larga sea la vida de la fisura reflexiva en laboratorio mayor será en campo.

Figura 4.19. Resultado típico del probador (cada ciclo de abertura y cierre es de 10s)



Fuente: Zhou, F., Scullion, T. Y Williammee, R; Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test.

Los parámetros que determinan la sensibilidad de la prueba son:

- Influencia de la temperatura en la vida de la fisura reflexiva: Según los resultados obtenidos durante los ensayos de la prueba se concluyó que la temperatura tiene una influencia significativa en la vida de la fisura reflexiva de la mezcla de asfalto, concluyendo que a menor temperatura de la prueba, la vida de la fisura reflexiva disminuye y viceversa.

- Influencia del desplazamiento de la abertura en la vida de la fisura reflexiva: Los investigadores concluyeron que con un aumento en el desplazamiento de la abertura, la vida de la fisura reflexiva de las mezclas de asfalto disminuye.
- Influencia del contenido de asfalto en la vida de la fisura reflexiva: Se pudo observar que a mayor contenido de asfalto, mayor es la vida de la fisura reflexiva en las mezclas asfálticas.
- Influencia del grado de funcionamiento (PG “Performance Grade”) del asfalto en la vida de la fisura reflexiva: Una disminución del grado de funcionamiento de la carpeta de asfalto, indica que cuanto más dura sea la carpeta de asfalto, más baja es la resistencia de la fisura reflexiva.
- Influencia del contenido de un vacío de aire en la vida de la fisura reflexiva: Se demostró que un alto contenido de vacíos de aire muestra una mejor resistencia de la fisura reflexiva. Esta conclusión se obtuvo para el ensayo específico tratado en este documento, pero también se pudo concluir que este parámetro es incierto y es propio de cada caso, debido a que influyen diferentes variables.

–

4.1.2.3. *Simulación de los efectos combinados de fuerzas térmicas y cargas de tráfico*

En este tipo de pruebas se busca simular las combinaciones de solicitaciones descritas en el capítulo II. Entre las más citadas se encuentran la prueba de retracción-flexión desarrollada por el Laboratorio Regional de los Puentes y Caminos (LRPC) de Autun, la prueba ETS de la Escuela de Tecnología Superior de la Universidad de Quebec, la prueba SIFIRE desarrollada en el Laboratorio LAMI de la Escuela Nacional de Puentes y Caminos ENPC y la prueba WRC desarrollada en el laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid.

4.1.2.3.1. Prueba de retracción-flexión del LR de Autun

Esta prueba fue diseñada por el laboratorio regional de los puentes y calzadas de Autun, Francia; esta máquina de fisura (presentada en la Figura 4.20) es sometida a solicitaciones de flexión simulando el tráfico y de tracción simulando las fuerzas de retracción térmica. Este dispositivo se usa sobre todo con el objetivo de comparar la eficiencia de los sistemas anti-reflejo de fisuras interpuestos en un pavimento con el fin de retardar la aparición de fisuras en la superficie.

La probeta utilizada en este ensayo, en términos generales, consta de las siguientes partes:

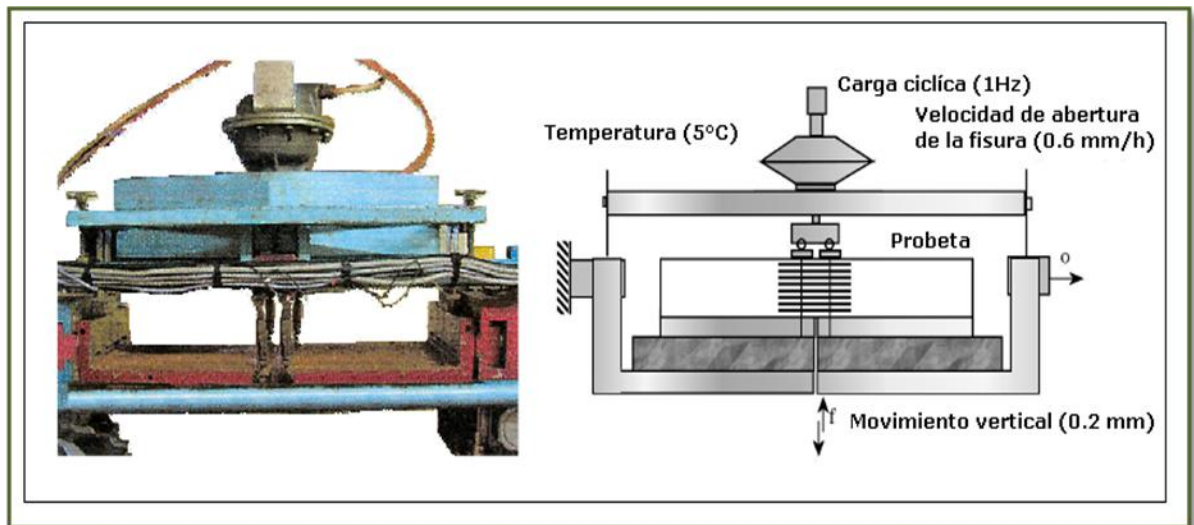
- Una capa de 80 mm de mezcla bituminosa, compuesta por 20 mm de arena-betún más 60 mm de una mezcla de referencia; esta mezcla se utiliza cuando se está probando un sistema antirreflexión. El espesor de la capa bituminosa puede ser en su totalidad de una mezcla específica a la que se le quiera determinar su resistencia a la reflexión de fisuras.
- Un sistema antirreflexión, que puede o no estar presente (no estará presente si solo se quiere ensayar la mezcla).
- Una base de 15 mm de espesor de mezcla bituminosa prefisurada; sobre la cual se adhiere el sistema antirreflexión a ensayar o directamente la mezcla bituminosa a probar.
- La probeta conformada por los elementos anteriormente descritos se une a dos placas metálicas con una separación de 10 mm, que simula una junta o fisura. Una probeta típica de ensayo cuenta con unas dimensiones de 560X110x80 mm.

El ensayo de Autun permite realizar un seguimiento de la velocidad de aumento de la fisura a través del espesor de una muestra representativa del complejo que se quiere probar, cada probeta representativa del complejo, es sometida a dos sollicitaciones simultáneas:

- Una tracción longitudinal continua lenta, simulando la retracción térmica de la estructura mediante la abertura de la fisura a una velocidad constante de 0.6 mm/h,
- Una flexión vertical cíclica, a una frecuencia de 1Hz, imponiendo un movimiento vertical de 0.2mm, simula el tráfico.

El seguimiento a la propagación de la fisura se sigue por medio de una red de hilos conductores, los cuales se rompen a medida que la fisura los va atravesando. El ensayo se realiza a una temperatura de 5°C con el fin de evaluar la condición más favorable para el desarrollo de la fisura reflexiva; durante éste se sigue el procedimiento de inicio de la fisura en la capa de rodamiento, velocidad de propagación y tiempo que tarda la fisura hasta que se produce la rotura de la probeta.

Figura 4.20. Resultado Esquema del dispositivo del LR Autun



Fuente: Dumas, Ph Y Vecoven, J.; Processes Reducing Reflective Cracking.

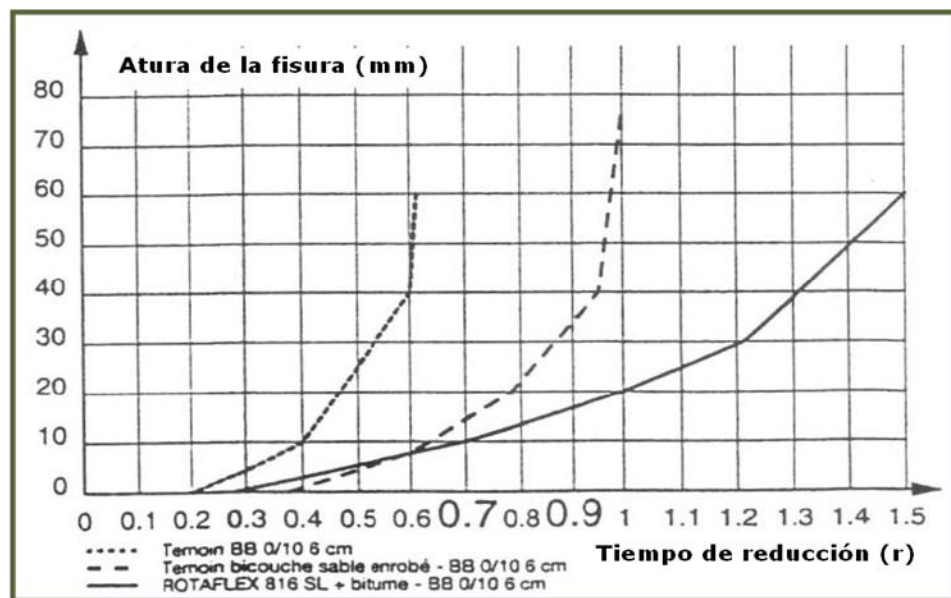
La eficiencia del sistema antirreflexión se evalúa mediante un coeficiente “r” que se obtiene dividiendo el tiempo que tarda la fisura en aparecer en la superficie de la mezcla asfáltica ensayada, por el tiempo que tarda la fisura en aparecer en un sistema utilizado como referencia, el cual está formado por 20 mm de arena-betún y 60 mm de mezcla bituminosa convencional. Este coeficiente tiene establecidos los siguientes intervalos para clasificar la eficiencia del sistema:

- Si $r < 0,7$ el sistema se clasifica como ineficaz.
- Si $0,7 < r < 0,9$ el sistema es medianamente eficaz.
- Si $r > 0,9$ el sistema es muy eficaz.

A manera de ejemplo se presenta en la Figura 4.21. los resultados de una serie de ensayos realizados sobre este dispositivo con el fin de probar la eficiencia de una

grilla de fibras de vidrio Rotaflex. El sistema estudiado se comparo contra dos testigos (uno constituido solamente por hormigón bituminoso “Testigo BB (Béton Bituminuex)” y el otro formado por un interfaz con dos capas, una de arena y una de hormigón bituminoso, “testigo de dos capas”, de esta manera se concluyó que la grilla debería prolongar el tiempo de vida de la estructura en un 47%.

Figura 4.21. Resultados de pruebas de retracción-flexión para probetas reforzadas con la grilla Rotaflex



Fuente: 6DSolutions; Roadtex, Rotaflex et Cidex : grilles de fibre de verre pour renforcement d'enrobé; 2001. Citado por: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

Según Dumas y Vecoven (1993), el ensayo de Autun permite probar y clasificar las diferentes alternativas de sistemas antirreflexión bajo un ángulo cualitativo, pero en ocasiones la posición relativa de las alternativas dentro de la clasificación es diferente de lo que se observa en la realidad; dado que los resultados obtenidos no siempre se han podido validar con relación al comportamiento in situ. Debido a estos resultados, los mismos autores manifestaron la necesidad de desarrollar una máquina que permitiera simular completamente las condiciones

reales de una estructura de pavimento, razón por la cual se concibió el dispositivo llamado máquina MEFISTO, del cual se hablará a continuación.

4.1.2.3.2. Prueba ETS (Escuela de Tecnología Superior, Universidad de Quebec)

La Escuela de tecnología Superior de la Universidad de Quebec fue la creadora de la prueba ETS. El objetivo principal de esta prueba es evaluar el comportamiento de una muestra bajo las sollicitaciones simultáneas de retracción térmica y de acción del tráfico.

Al igual que la mayoría de dispositivos esta prueba se centra en probar un complejo constituido por una capa base pre-fisurada, un sistema de antirreflexión que puede o no estar presente y una capa superior de refuerzo.

En términos generales el procedimiento del ensayo consiste en posicionar la muestra sobre dos plataformas, una móvil en el plano horizontal y la otra móvil en el plano vertical. Éstas tienen el fin de imponer las sollicitaciones, mediante un movimiento cíclico aplicado a cada una de las plataformas móviles. El movimiento horizontal (método I) es aplicado por una biela activada mecánicamente por medio de una transmisión motorizada (Figura 4.22.) y el movimiento vertical (método II) por una prensa MTS (Figura 4.23.). El conjunto del montaje se instala en una habitación térmica que permite controlar la temperatura.

Figura 4.22. Esquema de la prueba por sollicitación térmica

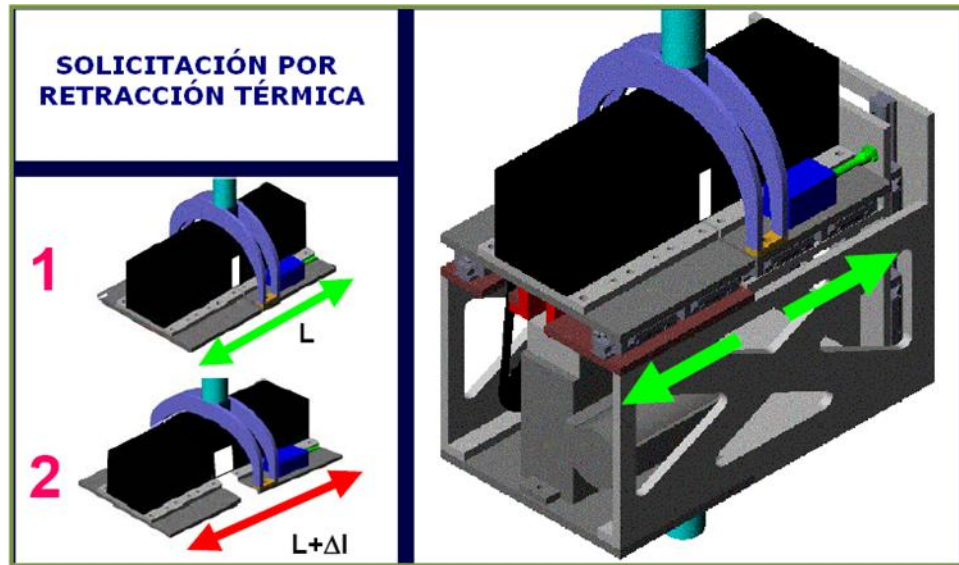
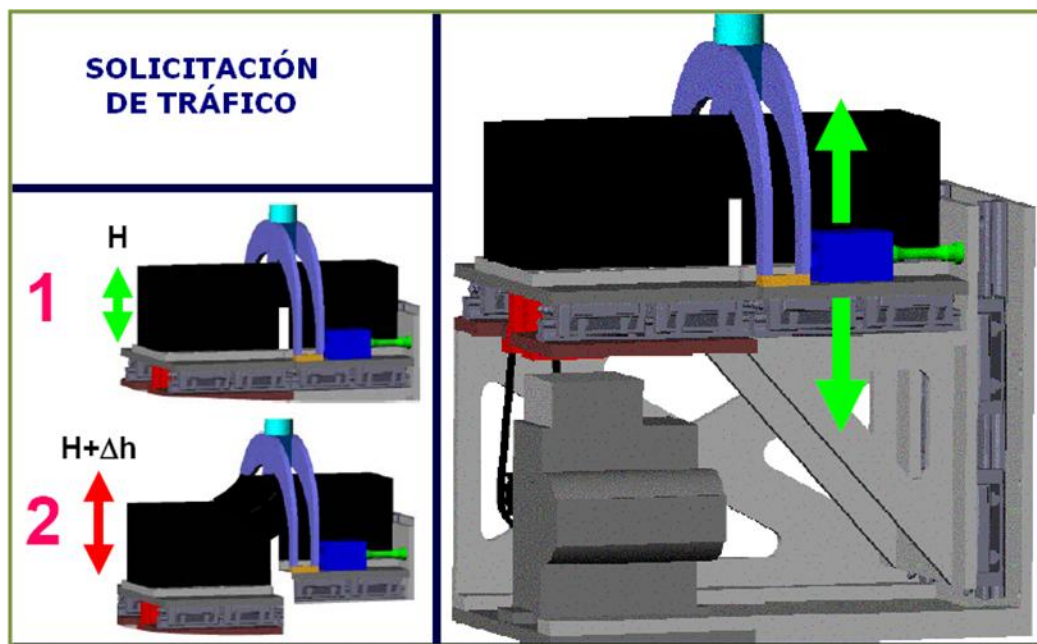


Figura 4.23. Esquema de la prueba por sollicitación de tráfico

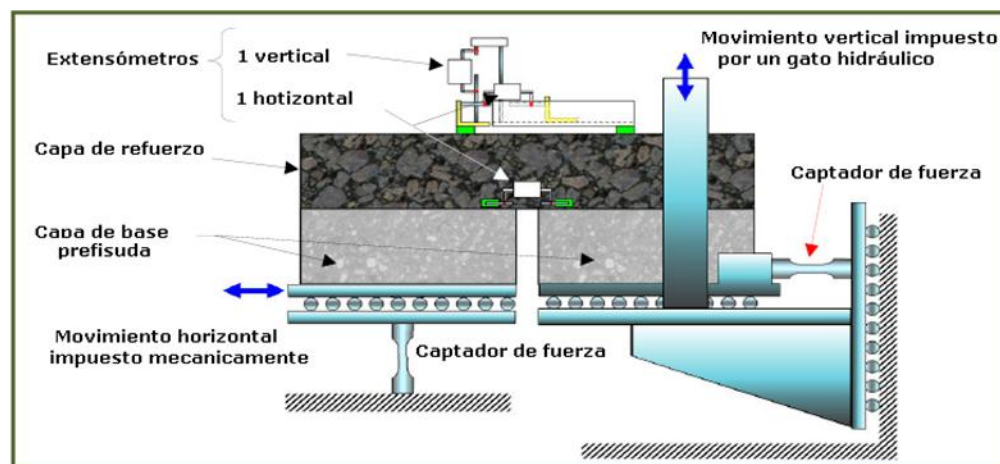


Fuente: Meunier y Perraton; La Remontée Des Fissures Dans Les Systèmes De Resufaceage. Une Nouvelle Méthode D'essai En Laboratoire.

El dispositivo experimental está constituido por tres captadores de fuerza y tres captadores de desplazamiento. Dos de los tres captadores permiten conocer directamente el esfuerzo transmitido horizontalmente en la capa de refuerzo. El tercer captador mide el esfuerzo vertical impuesto sobre la muestra por la prensa MTS. Además de estos captadores de fuerza la prensa MTS posee una célula de carga de alta fiabilidad. Los captadores de desplazamiento son de tipo extensómetro a capacidad resistente (MTS). Los tres captadores permiten medir desplazamientos relativos, los cuales se colocan cerca de la fisura. Dos se usan para medir el desplazamiento horizontal (uno colocado en el interfaz de las dos capas y otro en la superficie de la capa de refuerzo) y el otro captador se usa para medir el desplazamiento vertical (colocado en la superficie de la capa de refuerzo).

Para ilustración de lo anteriormente dicho se presentan a continuación la Figura 4.24. que representa un esquema de la prueba y tres fotos que muestran el dispositivo en condiciones reales de prueba.

Figura 4.24. Esquema representativo de la probeta ETS



Fuente: Guissi G.; La remontée des fissures dans les re-surfaçages : Développement d'une méthodologie de conception des re-surfaçages; 2005. Citado por: Perez Romero, S.A.; Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussées.

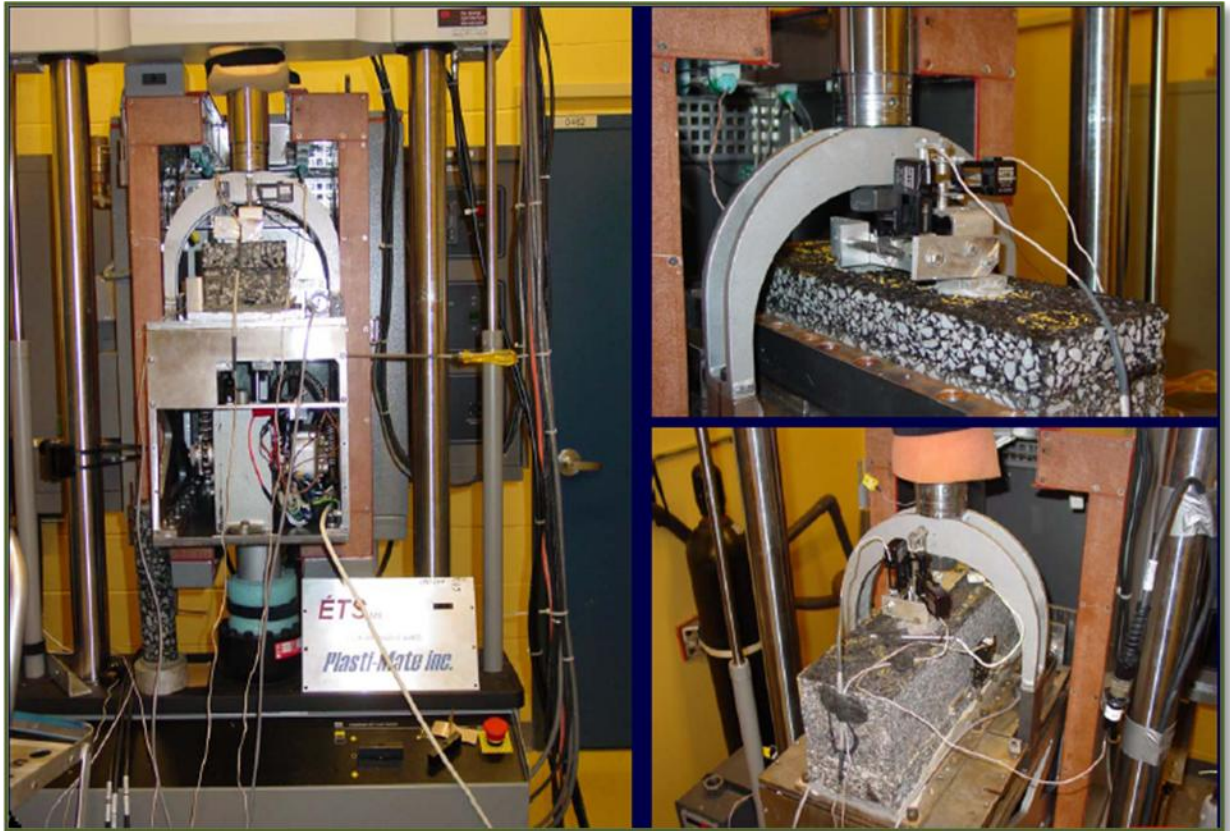
La simulación de la tensión térmica se realiza de manera mecánica en condiciones isotérmicas considerando los niveles de deformaciones creados por la retracción impedida en el enfriamiento a partir de las características de dilatación térmica de los materiales probados.

Con el fin de representar en el laboratorio las condiciones reales vistas en campo, la prueba debería realizarse a una frecuencia de $5,5 \cdot 10^{-5}$ Hz. Sin embargo el dispositivo solamente permite realizar ensayos a una frecuencia de $3,2 \cdot 10^{-4}$ Hz. La variación de la abertura de la fisura es de 1 mm.

La amplitud del movimiento vertical es función de tres parámetros: la capacidad residual de la estructura de la calzada, el espesor de la capa de refuerzo, las características del material de refuerzo.

Para probar los materiales bituminosos disponibles en Quebec, el desplazamiento vertical impuesto fue de 0.02mm a una frecuencia 1 Hz. La temperatura a la cual se llevan a cabo las pruebas se encuentra entre 5°C y -5°C .

Figura 4.25. Fotos del dispositivo en condiciones reales



Fuente: Meunier y Perraton; La Remontée Des Fissures Dans Les Systèmes De Resufaceage. Une Nouvelle Méthode D'essai En Laboratoire.

4.1.2.3.3. Prueba SIFIRE (Simulación de la Fisura Reflexiva)⁴²

El dispositivo de pruebas SIFIRE (Simulation de la Fissuration REflective) se describe en el marco de la tesis de Celine Florence (2005). Desarrollado en el laboratorio LAMI de la Escuela Nacional de Puentes y Caminos, con el fin de reproducir sobre una probeta de 1 m de longitud y 0.5 m de anchura las condiciones de sollicitación propias de la fisura reflexiva.

⁴² Florence; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires; 2005.

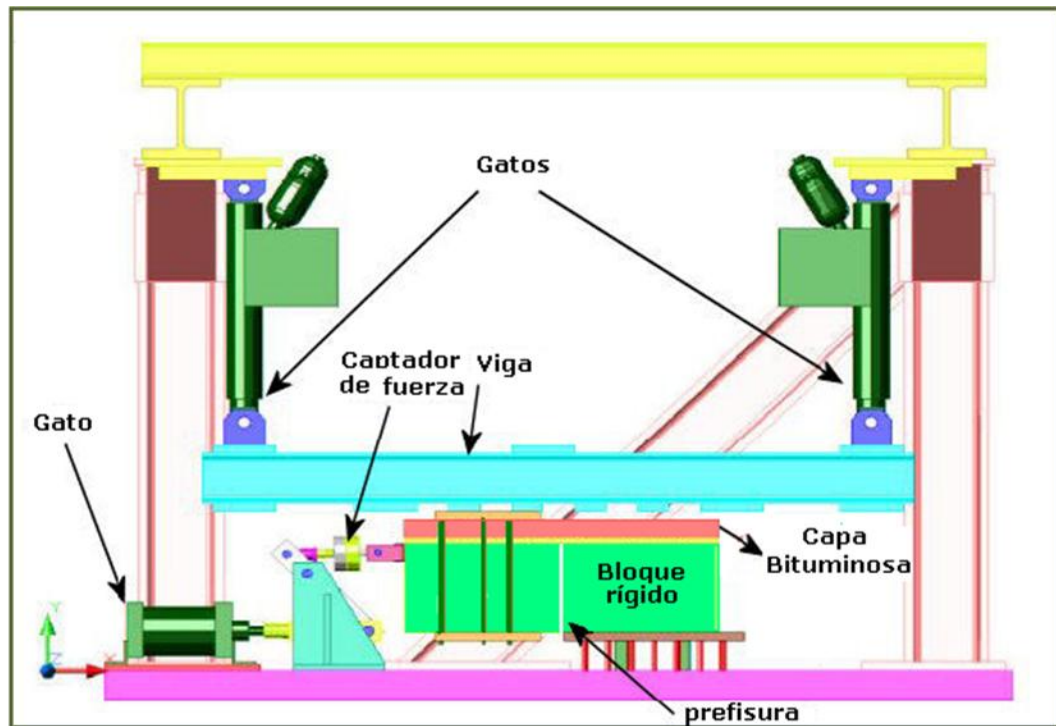
Este armazón se diseñó con el fin de servir a dos tipos de pruebas: la prueba SIFIRE y la prueba TRÁFICO.

La estructura compuesta por dos gatos verticales y una viga (Figura 4.26.) tiene por objeto:

- Controlar el par (cizallamiento; momento de flexión) en la capa bituminosa de la probeta (prueba SIFIRE), gracias al ajuste de la viga sobre la semi-longitud de la probeta.
- Simular el despliegue de una carga de camiones y en consecuencia la rotación de los esfuerzos en la capa bituminosa (prueba TRÁFICO), gracias a la instauración de un casco circular bajo la viga que produce un desplazamiento pendular de tipo “movimiento ondulatorio” del conjunto.

El banco de pruebas SIFIRE está constituido por una armazón que consta de dos pórticos a los cuales se conectan dos gatos verticales y un gato horizontal (ver Figura 4.26.). Inicialmente la prueba se utilizó para la simulación de las carga de tráfico, que son impuestas mediante la conexión de los gatos verticales a una viga horizontal permitiendo aplicar el cargamento sobre la probeta; pero las características propias del dispositivo le permite tener en cuenta la temperatura por la utilización del gato horizontal. Después de un estudio experimental se demostró que la sollicitación combinada debido al tráfico y a las variaciones térmicas permitía comprender mejor su incidencia sobre la fisura reflexiva.

Figura 4.26. Banco de prueba SIFIRE de la ENPC



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

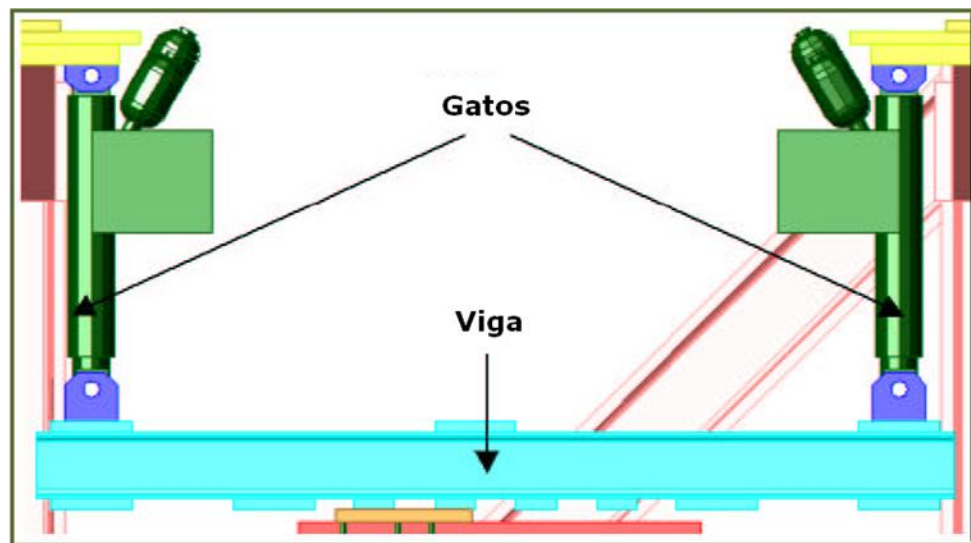
Para el sistema de cargamento vertical (Figura 4.27.), se eligieron gatos hidráulicos de tipo HIFI J ST 63/45-060, que son conectados a una central hidráulica (40 l/mn). Las características principales de estos gatos lineales son:

- Sección de compresión 31.17 cm².
- Sección de tracción 15.27 cm².
- Esfuerzo nominal estático de compresión a 210bar es de 65 KN.
- Esfuerzo nominal estático de tracción a 210bar es de 32 KN.
- Esfuerzo nominal dinámico de compresión a 180bar es de 56 KN.
- Esfuerzo nominal dinámico de tracción a 180bar es de 27 KN.

- Masa 57 kg.

La dirección de los gatos está garantizada por un anillo de deslizamiento en material compuesto tratado, lo que permite soportar elevadas velocidades bajo cargas radiales, e induce fricciones muy escasas.

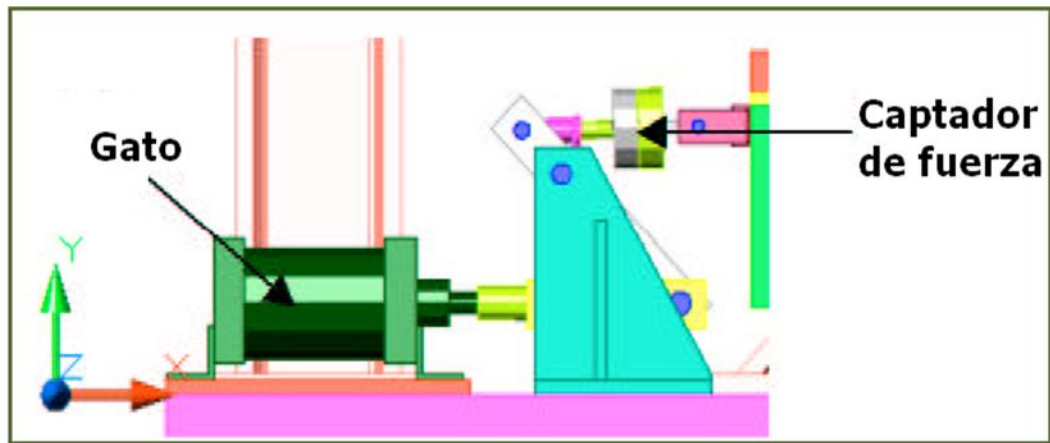
Figura 4.27. Dispositivo viga más gatos de aplicación del cargamento vertical



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

Para el simular el sistema de cargamento horizontal era necesario aplicar una carga horizontal sobre la probeta con el fin de reproducir el estado de compresión en la capa bituminosa al paso de un camión. Esta carga es aplicada por un gato neumático al cual se añadió un sistema mecánico de tipo “brazo de palanca” para triplicar la amplitud de la carga del gato (Figura 4.28.).

Figura 4.28. Dispositivo de tipo “brazo de palanca” de aplicación de la carga horizontal



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

El gato neumático que garantiza el cargamento horizontal es proporcionado por la sociedad FESTO y es de tipo DNG-160-PPVA con las siguientes características:

- Diámetro del pistón: 160 mm.
- Presión de servicio: 0.6 - 10 bar.
- Fuerza teórica bajo 6bar, al retroceso: 11310 N.
- Fuerza teórica bajo 6bar, o el anticipo: 12064 N.

Este actuador permite transformar la energía del aire comprimido en un trabajo mecánico. El gato es capaz de desarrollar la fuerza disponible en los dos sentidos de su eje longitudinal.

Con ayuda de un ordenador proveído de una tarjeta de adquisición y de un programa informático de desarrollo de aplicación (LabVIEW) se realiza el control de los gatos y la adquisición de los datos resultantes de los captadores. El control

se realiza en desplazamiento con el fin de obtener una señal más propia, pero es controlado por fuerza (en cada ciclo el programa compara la fuerza medida en cada gato con la fuerza impuesta.) Seguidamente se realiza una corrección de señal e intensidad variable en función de la divergencia calculada.

La prueba se realiza dentro de un recinto térmico en el cual la temperatura es mantenida constante a 10°C. EL control de la temperatura se realiza mediante tres captadores (termopares de tipo K).

Figura 4.29. Armazón de la prueba SIFIRE y probeta



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

Para comandar y controlar el sistema hidráulico se colocó un captador de presión y un captador de posición LVDT integrados en la cabeza de cada uno de los dos gatos. Los movimientos de los dos gatos se controlan de manera independiente uno del otro mediante un bucle de retroalimentación y gracias a una servo-válvula presente en cada uno.

El gato neumático es comandado por un electro-distribuidor conectado al ordenador por intermedio de una tarjeta de adquisición. El control de la fuerza impuesta sobre la probeta se realiza gracias a un captador de fuerza intermedio.

Al igual que las pruebas anteriormente descritas el seguimiento de la propagación de la fisura en la capa se realiza mediante una capacidad de fisura colocada a cada lado de la probeta y alrededor de la fisura artificialmente creada en la capa en hormigón. La capacidad de fisura consiste en una red de hilos conductores colocados en la probeta, los cuales están conectados a una central de adquisición. A medida que la fisura se propaga, se alcanzan los hilos y los rompe, y la central registra a cada momento cuáles son los que se van rompiendo y de esta manera se obtiene la altura de la fisura.

4.1.2.3.4. Prueba WRC (*Wheel Reflective Cracking*)⁴³

Este nuevo banco de pruebas fue desarrollado por el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid por Jorge N. Prieto (2006). Mediante esta prueba se pueden simular los tres tipos de movimientos producidos en las fisuras y las juntas de los pavimentos, causantes de la reflexión de fisuras en las capas bituminosas, mencionadas en el Capítulo II del presente informe, los cuales corresponden a: abertura de las fisuras o juntas por descensos de temperaturas, abertura de las fisuras o juntas por flexión del pavimento y movimiento vertical

⁴³ Prieto Muñoz, J. N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficacia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

relativo entre los bordes de la fisura o junta; estos movimientos representan las condiciones reales vistas in situ.

También se puede realizar un estudio comparativo de la eficiencia relativa de sistemas antirreflexión como el diseño de mezclas que sean resistentes a la reflexión de fisuras.

El desarrollo de la nueva prueba de laboratorio WRC se realizó utilizando una secuencia metodológica teniendo en cuenta algunos criterios dados por la norma ASTM 632-82 (1996).

Por medio de esta prueba se podrá establecer un procedimiento de laboratorio que permita: medir la resistencia relativa a la reflexión de fisuras de una mezcla bituminosa, medir la resistencia relativa a la reflexión de fisuras de una alternativa compuesta de un sistema antirreflexión y una capa de mezcla bituminosa, medir la eficiencia de un sistema antirreflexión y diseñar una mezcla optimizando su resistencia a la reflexión de fisuras.

En la primera etapa de la prueba se hizo una caracterización de los materiales a ensayar, teniendo en cuenta que solo se usarán mezclas bituminosas y sistemas antirreflexión. Seguidamente se hace una identificación de las características críticas del comportamiento de las probetas, las cuales corresponden a las propiedades cuyos cambios de estado durante la prueba evidencian la degradación de los materiales; estas características se pueden ver mediante observación visual o por medición con instrumentos. Finalmente se definen los factores y mecanismos de degradación que favorecen a la fisura.

Los factores considerados como los más importantes son las bajas temperaturas, los cambios de temperatura, el movimiento vertical relativo entre los bordes de la fisura, y la deflexión de la calzada.

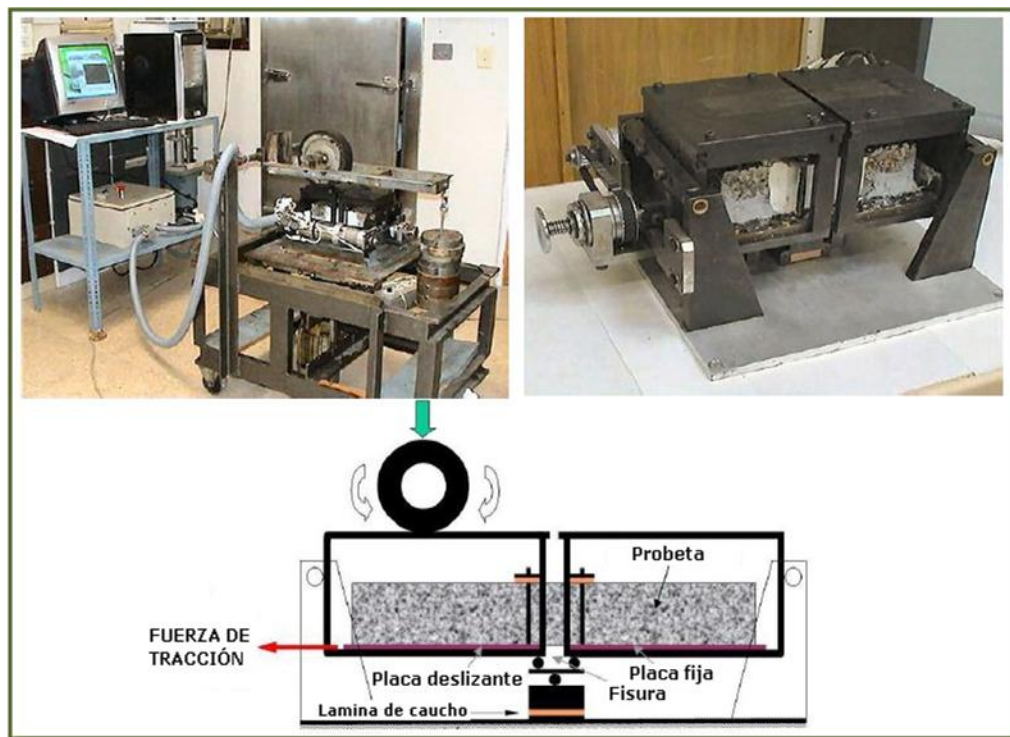
Los procesos mecánicos causados por estos factores se definieron teniendo en cuenta la evolución del dispositivo de pruebas de la siguiente manera:

- Las temperaturas bajas contribuyen al incremento del módulo de elasticidad de las mezclas bituminosas disminuyendo su capacidad de deformación, haciéndolas más susceptible al fisuramiento.
- Los cambios de temperatura son críticos en el marco de la reflexión de fisuras cuando se producen descensos de temperatura. La capa fisurada se retrae incrementando la abertura de las fisuras o juntas provocando unas altas tensiones y deformaciones horizontales en la capa bituminosa; además se produce también una reducción en la transferencia de carga en las fisuras y juntas que no poseen un sistema de transferencia.
- El movimiento vertical relativo entre los bordes de la fisura genera esfuerzos de cizallamiento o tensiones de corte en la capa de rodamiento.
- La deflexión en la estructura de calzada está vinculada a los aumentos de las deformaciones horizontales y esfuerzos de tracción a la base de la capa bituminosa. Estos dos efectos favorecen la abertura de las fisuras existentes en la capa sobre la que ha sido colocada la mezcla bituminosa.

Una segunda etapa consiste en definir los sistemas para la simulación de los mecanismos de degradación en la prueba, los cuales se presentan de forma simultánea en la realidad. Los sistemas de simulación de los mecanismos de degradación se definieron en función de las posibilidades proporcionadas por el banco WRC, teniendo en cuenta que en el nuevo ensayo se utilizarán como carga una rueda móvil.

Algunos de estos sistemas fueron el resultado último de un proceso iterativo y progresivo durante el cual se ensayaron diferentes opciones hasta llegar a la obtención de una configuración que permitiera incorporar simultáneamente los factores de deterioro descritos anteriormente. En la Figura 4.30. se puede observar dos fotos y un esquema de la máquina del nuevo ensayo desarrollado.

Figura 4.30. Esquemas de la prueba WRC desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

En el marco del desarrollo de esta investigación se definió una configuración que garantiza la simulación de los factores de degradación de la siguiente forma:

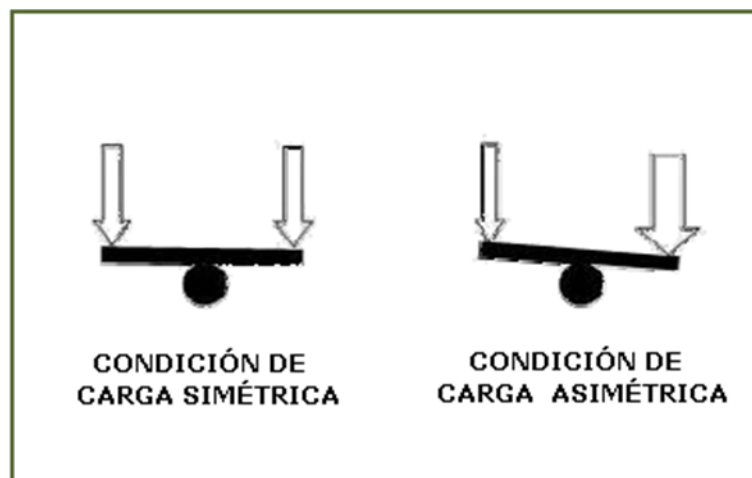
- Temperaturas bajas: Se estableció que para simular el mecanismo de deterioro por temperaturas bajas, la temperatura base escogida para la realización de la

prueba fue de 5 ± 1 °C. El Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid equipó una cámara que permite fijar la temperatura en un intervalo entre 0 y 20 °C, con el propósito de llevar a cabo otro tipo de estudios.

- Cambios de temperatura: El mecanismo usado para simular un descenso en la temperatura consiste en un sistema de placas deslizantes que permiten aplicar a la probeta tensiones y deformaciones horizontales (ver figura 4.30). Este sistema está compuesto por dos placas denominadas “de adherencia” que se fijan a otras dos llamadas “de soporte”; las placas se encuentran separadas una distancia de 1cm con el objetivo de simular la fisura o junta que se reflejará en la probeta, la probeta es fijada mediante un adhesivo sintético a las placas de adherencia. Durante la prueba una de la placas permanece fija mientras que la otra impone un desplazamiento horizontal progresivo que aumenta la separación entre las placas de adherencia, causando una retracción de las losas de hormigón o de los bloques del pavimento fisurado e incrementando la abertura de las fisuras o juntas, pero restringiendo los demás movimientos. La fuerza de tracción se aplica utilizando un micro-motor que impone la fuerza o el desplazamiento de manera continua. En este ensayo se utilizó una velocidad de 0.6mm/h, aplicando un desplazamiento total de 10mm. a velocidades de tracción entre 100 y 0,001 $\mu\text{m/s}$ con el fin de poder simular una gran variedad de cambios de temperaturas.
- Movimiento vertical relativo entre los bordes de la fisura: Este mecanismo se simuló mediante un balancín sobre el cual se apoyan los bordes de las placas de soporte que suponen las dos losas o bloques a ambos lados de la fisura (ver Figura 4.31). Cuando la posición de la carga es simétrica con relación a la fisura, los desplazamientos verticales de los bordes de la fisura son teóricamente iguales, presentándose deflexión pero no movimiento vertical relativo de los bordes de la fisura. Cuando no se presenta simetría de la

ubicación de la carga con respecto a la fisura, se genera un movimiento hacia abajo en ese lado del balancín y un movimiento hacia arriba en el lado no cargado. Después de la realización de las pruebas, se observó que en el lado no cargado actúa una fracción de la carga total, la cual depende del coeficiente de transferencia de carga de la fisura o junta y de la capacidad de la capa bituminosa para distribuir la carga. De otra parte también se pudo concluir que mientras la sección transversal de la probeta situada sobre la fisura tiene resistencia y capacidad estructural para transferir carga al lado no cargado de la fisura, los movimientos verticales relativos son muy bajos. Sin embargo, a medida que el material es debilitado por acción de diversas solicitaciones, los movimientos verticales relativos aumentan de manera considerable y tienen una mayor importancia en la fase final de propagación de la fisura.

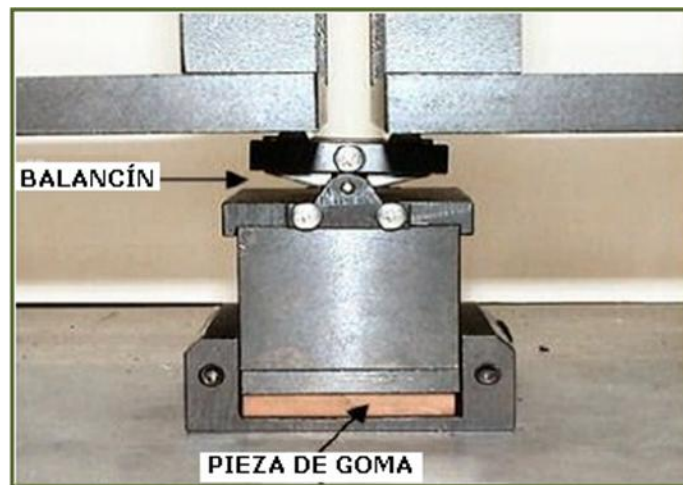
Figura 4.31. Esquemas del dispositivo usado para simular el movimiento vertical relativo de los bordes de la fisura junta



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

- Deflexión: Este es el último mecanismo de sollicitación que se tiene en cuenta para el desarrollo de la prueba vinculado al fenómeno de la reflexión de fisuras. Fue simulado mediante la colocación de una lámina de goma con espesor de 5 mm como soporte del balancín (ver Figura 4.32.); por lo tanto, independiente del movimiento vertical relativo, en el centro de la probeta se presenta un desplazamiento vertical por efecto de la deformación de la goma. Cabe resaltar que este desplazamiento varía con la realización de la prueba, ya que al comienzo del ensayo la probeta tiene mayor resistencia y se defleca menos, y a medida que avanza la prueba se presenta un debilitamiento de la probeta, aumentando la deflexión hasta alcanzar el valor máximo admisible, dependiendo de las laminas de goma colocadas en el soporte. En los ensayos realizados en esta prueba se simularon dos magnitudes de deflexión máxima mediante dos laminas de goma de dureza Shore D de 63 y de espesor 5 mm, cada una con una deflexión máxima admisible de 0.30 mm y 0.45 mm respectivamente.

Figura 4.32. Ubicación de la goma que simula la deflexión de la probeta



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

Por último tenemos la etapa de la definición del criterio o parámetro de terminación de la prueba así como su valor límite. En primera instancia se identificaron los diferentes parámetros como criterios de fallo: longitud vertical de la fisura, deflexión o desplazamiento vertical y movimiento vertical de los bordes de la fisura o junta de la capa fisurada. El proceso de selección del criterio de falla consistió en la observación de los resultados obtenidos evaluando cada uno de los criterios supuestos mediante la realización de varios ensayos. Prieto propuso realizar la finalización de la prueba con relación al movimiento vertical relativo de los bordes de la fisura. En este criterio se considera un indicador objetivo el estado estructural de la probeta y su capacidad para transferir las cargas al lado no cargado de la fisura.

En el desarrollo de la prueba WRC, se consideró que una muestra ha alcanzado su estado límite cuando el desplazamiento vertical relativo entre los bordes de la fisura en la base de la probeta alcanza un valor de 0.2 mm. En las pruebas realizadas se observó que cuando se presenta dicho valor, la fisura ya se ha propagado a lo largo de todo el espesor de la probeta, y en ocasiones se podía ver el movimiento entre las dos partes de la muestra ubicadas a lado y lado de la fisura. Puede ocurrir que las dos partes de la probeta sigan aún conectadas y resistan mayores desplazamientos verticales relativos sin que se divida la probeta, pero su capacidad para transferir carga entre los bordes de la fisura se considera insuficiente, evidenciando en la superficie fisuras reflejadas de media y alta severidad.

Cabe resaltar que el desarrollo de esta prueba se hizo de manera secuencial, probando 4 prototipos de prueba, en los cuales se les iban adicionado de forma gradual los factores de deterioro implicados en la reflexión de fisuras hasta llegar a simularlos simultáneamente. De otra parte la prueba se desarrolló a partir de la máquina de ensayo de pista de laboratorio, la cual facilitará su acceso por diversos laboratorios interesados en el fenómeno de la reflexión de fisuras.

Este estudio también permitió realizar un análisis de la sensibilidad de la prueba con relación a las variaciones de la velocidad de abertura de la fisura y de la magnitud de la deflexión, en el cual se concluyó que la prueba es sensible a dichas variaciones, lo que implicaría la importancia de simular en laboratorio diversas condiciones climatológicas que afectan la velocidad de la abertura por los descensos de temperatura, así como las condiciones estructurales del pavimento en función de la magnitud de la deflexión.

4.1.2.3.5. Banco de fatiga MEFISTO⁴⁴

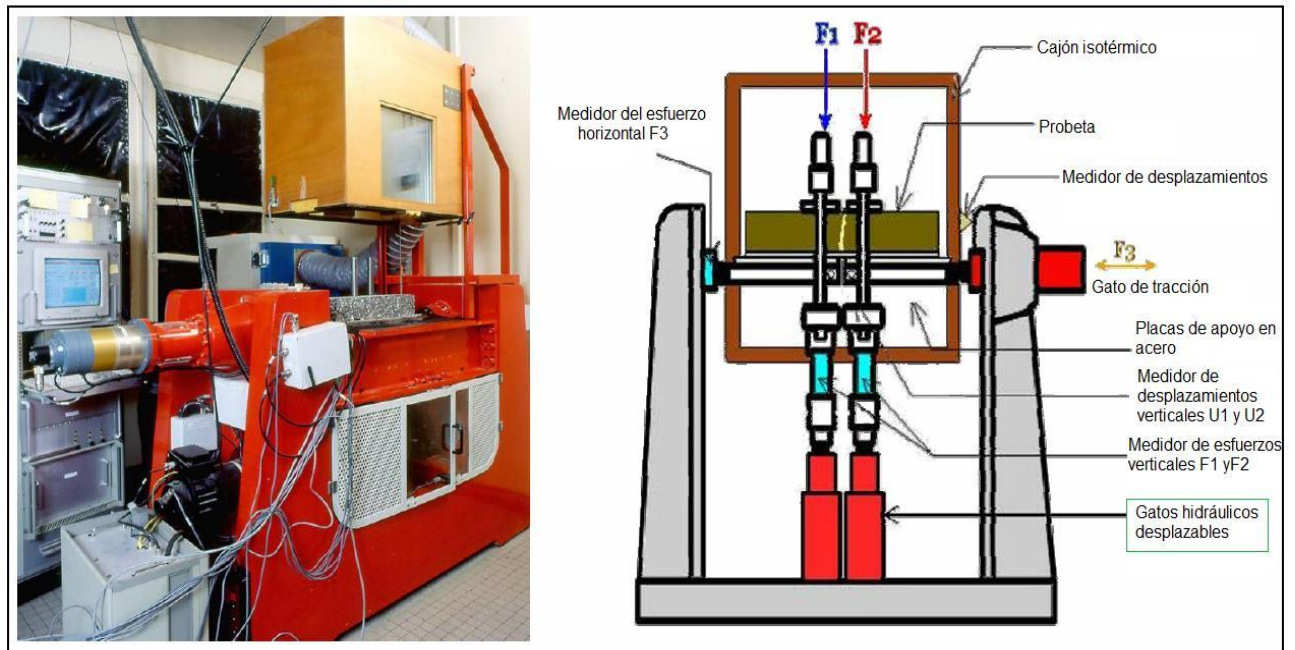
El banco de fatiga MEFISTO fue desarrollado para evaluar las técnicas antirreflexión de fisuras utilizadas en calzadas reales, teniendo en cuenta aspectos poco comunes como la geometría de la calzada, característica relevante cuando se tiene una base discontinua, y trabajar en temperaturas bajas entre -5°C y -10°C, sumando un sistema de esfuerzos generado de tal manera que la prueba estará estrechamente relacionada con el fenómeno presentado en campo o en su defecto con las pruebas FABAC realizadas (prueba que se explicará más adelante).

La máquina consta de dos placas de acero discontinuas sirviendo de base, a su vez pueden moverse horizontalmente para simular la apertura de la fisura que podría generar el efecto térmico. La probeta es sometida a la acción de dos columnas verticales conectadas a un mismo elemento en donde se puede determinar la excentricidad de acuerdo a la posición de la probeta. Al estar las columnas conectadas a un mismo elemento, los gatos hidráulicos desplazables pueden inducir un desplazamiento diferencial al conjunto placas, apoyo y probeta como una pulsación sinusoidal que se traduce en una simulación del efecto del tráfico produciendo así cizallamiento sobre la fisura. La Figura 4.33. presenta tanto

⁴⁴ Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees; 2007.

una imagen real de la máquina como un esquema realizado para entender el funcionamiento.

Figura 4.33. Principio de funcionamiento del banco de fatiga Mefisto



Fuente: Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

La probeta tiene unas dimensiones promedio iguales a las de los demás ensayos, 50 mm (alto) x 100 mm (ancho) x 560 mm (largo). El sistema es solicitado a tracción por el gato horizontal generador de la fuerza F_3 y en flexión por los gatos verticales generadores de las fuerzas F_1 y F_2 para que de esta manera se controlen esfuerzos y no deformaciones.

Sergio A. Pérez (2008) en su tesis doctoral propone mediante una modelación numérica del funcionamiento del banco un método para garantizar esfuerzos semejantes a los ocurridos en la prueba FABAC que él realiza en el mismo estudio

para que de esa manera se corrobore la similitud entre el banco MEFISTO y el fenómeno ocurrido en la práctica.

El modelo propuesto por Pérez es función de:

- La estructura de la calzada.
- La naturaleza y consistencia del bitumen utilizado.
- Las condiciones de cargamento (peso, velocidad, etc.)
- Las condiciones térmicas.

Luego del estudio propuso un protocolo de cargamento basado, como se dijo anteriormente, en los resultados obtenidos en la prueba FABAC realizada por él mismo, aunque deja claro que el estudio podrá ser perfeccionado al tener en cuenta aspectos tales como el desprendimiento parcial que ocurrirá entre el hormigón bituminoso y las discontinuidades geométricas de las calzadas (fisuras, juntas en el hormigón hidráulico, etc).

4.2. ENSAYOS DE LABORATORIO A ESCALA REAL

Actualmente existen dos proyectos a nivel mundial enfocados a la recolección de datos de pruebas a escala real, pero encaminados a hacer un recuento principalmente de resultados del modelo, dimensión de las calzadas, mantenimiento, incidencia de la carga y el efecto del neumático y su carga, sin mencionar en ningún momento el estudio específico de la fisura reflexiva. Estos dos proyectos son:

- COST 347: Este proyecto recolecta experiencias, hace un inventario de maquinaria disponible y archiva los autores de las diferentes pruebas con el fin

de completar un código europeo para la correcta realización de pruebas a escala real y optimización del manejo de la maquinaria simuladora de tráfico pesado.

- A2B52 Task Force on Full-Scale/Accelerated Pavement Testing: Intenta recolectar información de disponibilidad de maquinaria para realizar las pruebas a escala real alrededor del mundo al igual que experiencias en el mismo sector de investigación.

Todos los esfuerzos por adelantar estudios en esta área son de mucha ayuda para una futura investigación hacia el fenómeno de la fisura reflexiva. En su tesis doctoral Sergio A. Pérez (2008) documenta de manera muy completa una prueba a escala real realizada con el único motivo de estudiar a fondo el fenómeno de la fisura reflexiva, teniendo esta experiencia, tal como cita él, un enfoque totalmente innovador en comparación con las otras pruebas documentadas en la actualidad. A continuación se presentará una breve síntesis de la prueba en donde se podrán apreciar tanto conclusiones como medidas tomadas para asegurar la confiabilidad de los resultados.

4.2.1. Enfoque experimental y numérico de la fisura reflexiva de las calzadas⁴⁵

La experiencia fue realizada enfocada hacia el estudio de la fisura reflexiva para poder observar y cuantificar el funcionamiento y la evolución del método de degradación de la estructura además de la adquisición de datos experimentales para intentar modelar el estado de tensión de la estructura y una comparación entre diferentes métodos retardantes del fenómeno.

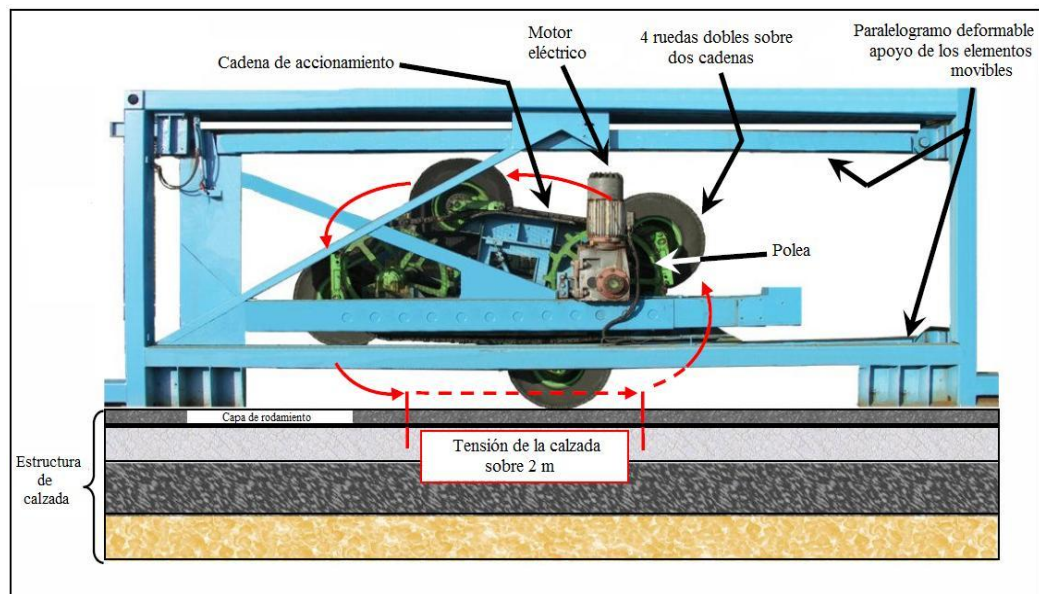
⁴⁵ Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees; 2007.

La prueba fue llevada a cabo sobre tableros de calzadas construidas únicamente para ese fin aplicándosele carga acelerada mediante el simulador de tráfico pesado FABAC en el Laboratorio Central de Puentes y Caminos de la Universidad de Limoges.

A. Máquinas FABAC

Las máquinas FABAC (ver Figura 4.34.) fueron desarrolladas en el proyecto nacional de investigación FABAC en 1995 [IREX 2000]. Permiten aplicar una carga rodante de 65 KN sobre una estructura, siendo esta carga equivalente a un eje de referencia de 130 KN. Unos gatos neumáticos corrigen continuamente la distribución de los esfuerzos entre los apoyos y la carga rodante, para mantener el esfuerzo aplicado sobre la estructura casi constante.

Figura 4.34. Principio de funcionamiento de las máquinas FABAC



Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

El marco metálico del equipo es de una longitud de 5,5 metros, permitiendo así aplicar la carga sobre una longitud de 2 metros sobre la calzada experimental a una velocidad máxima de 7 Km/h. Puede llegar a aplicar semanalmente hasta 350.000 repeticiones de carga siendo la supervisión humana del evento muy reducida, lo que brinda una gran ventaja ya que al mes estarían siendo aplicadas alrededor de 1.000.000 de repeticiones sobre la estructura simulando de manera muy sencilla más de 10 años de tráfico pesado sobre calzadas reales.

B. Descripción de la estructura de prueba

La estructura de prueba se construyó en el marco de la tesis “Durabilidad mecánica del encolado blanco sobre negro en las calzadas”⁴⁶. Está constituida por un recubrimiento en losas de hormigón cemento (BC5) de grosor medio 8 cm, colocadas sobre una grava asfáltica (GB3) de grosor medio 9.5 cm, todo esto sobre en una capa de fundación en arena cemento (SC) de 15 cm y un suelo de apoyo de fuerza de sustentación media de 110 MPa.

Se tendrán en cuenta diferentes tipos de estructuras de prueba diferenciadas por 3 tipos de complejos bituminosos, estos son:

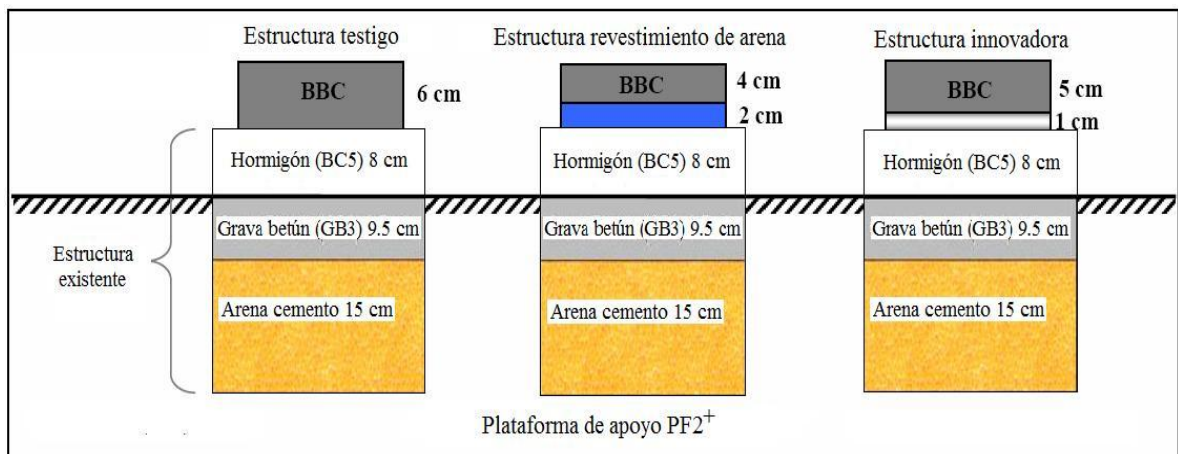
- Revestimiento bituminoso tipo BBC de grosor 6 cm.
- Revestimiento bituminoso tipo BBC de grosor 4 cm y 2 cm de arena betún.
- Revestimiento bituminoso con un complejo innovador en metal desplegado de grosor 1 cm (técnica Arcélor).

⁴⁶ Pouteau, B., Balay, J.-M., Chabot A.& De Larrard F.; Fatigue test and mechanical study of adhesion between concrete and asphalt; 2004. Citado por: Perez Romero, S.A.; Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees; 2007.

Los diferentes complejos bituminosos fueron aplicados sobre distintas juntas que presentan distinta interfaz de la siguiente manera:

- BBC de 6 cm para las juntas N° 1, N° 2, N° 7 y N° 8.
- BBC de 4 cm + arena-betún de 2 cm para las juntas N° 3 y N° 4.
- Metal desplegado de 1 cm + BBC de 5 cm para las juntas N°5 y N° 6.

Figura 4.35. Tres tipos de estructuras ensayadas en la series de pruebas



Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

La calzada tendrá una longitud de 27 metros y un ancho de 2 metros con juntas de construcción cada 2,75 metros. En cada junta se efectuaron diferentes tratamientos del interfaz entre la losa de hormigón y la grava asfáltica debido a necesidades especiales de la tesis de Bertrand Pouteau. Se distinguen los distintos tratamientos de la siguiente manera:

- Sin tratamiento: juntas N° 5, N° 7 y N° 9.
- Granuladas: juntas N° 6 y N° 8.

- Recubrimiento con hoja de polyane 50 cm por ambos lados: juntas N° 1 y N° 3.
- Granuladas y con polyane por ambos lados: juntas N° 2 y N° 4.

Las juntas N° 2, N° 3, N° 6 y N° 7 fueron dispuestas para el trabajo de Bertrand Pouteau, en donde se constataron algunos desprendimientos entre las losas en hormigón y la mezcla de grava y betún, después de un millón de repeticiones⁴⁷.

C. Realización de la prueba

Una prueba es una secuencia de repeticiones de carga que se realizarán hasta que, en el mejor de los casos, una fisura aparezca y cruce la capa de revestimiento ó hasta haber efectuado 1 millón de repeticiones sobre la junta probada.

Se programaron 3 series de prueba de 1 millón de repeticiones de carga cada una con una duración aproximada de 3 meses e implicando 2 tipos de estructuras de prueba que se realizaron simultáneamente con la ayuda de dos máquinas FABAC en el tiempo previsto.

Fueron programadas varias disposiciones para garantizar la homogeneidad de la estructura y la veracidad de la prueba tales como la profundidad de las juntas, la disminución de la transferencia de carga entre losas y la determinación del movimiento vertical de las juntas bajo una fuerza de 65 KN.

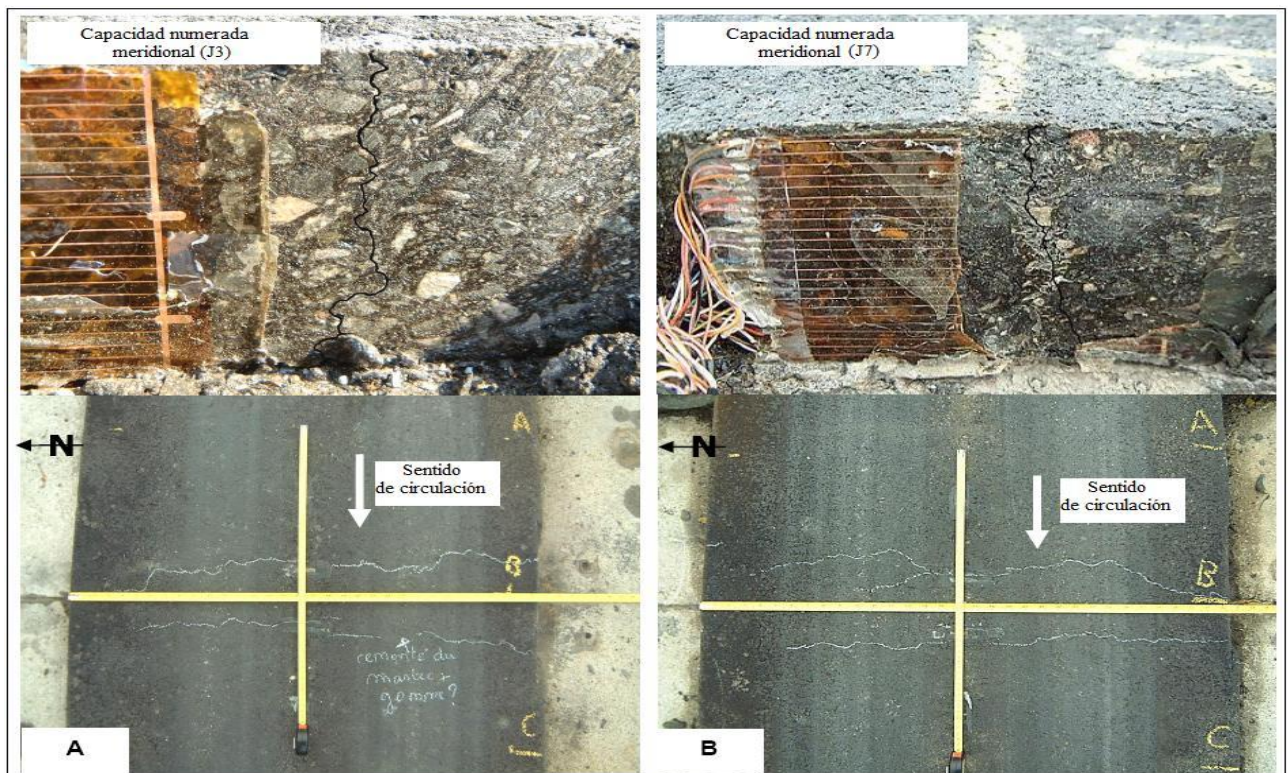
⁴⁷ Pouteau, B., Balay, J.-M., Chabot A.& De Larrard F.; Fatigue test and mechanical study of adhesion between concrete and asphalt; 2004. Citado por: Perez Romero, S.A.; Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees; 2007.

- Serie de pruebas N° 1

Se efectuó sobre las juntas N° 3 y N° 7. Comenzó el 7 de marzo de 2005 y terminó el 6 de abril de 2005 durando así 30 días. Durante la prueba se realizaron 654.750 repeticiones para obtener datos de temperatura, deflexiones y deformaciones transversales y longitudinales para el paso de una carga de 65 kN a una velocidad de 1 m/seg.

Se presentaron fisuras reflexivas dobles hacia las 450.000 repeticiones en las juntas N° 3 y N° 7 muy similares a ambos lados de la junta, tal como se evidencia en la siguiente imagen:

Figura 4.36. Fisuras en las juntas N° 3 y N° 7 a las 654.000 repeticiones



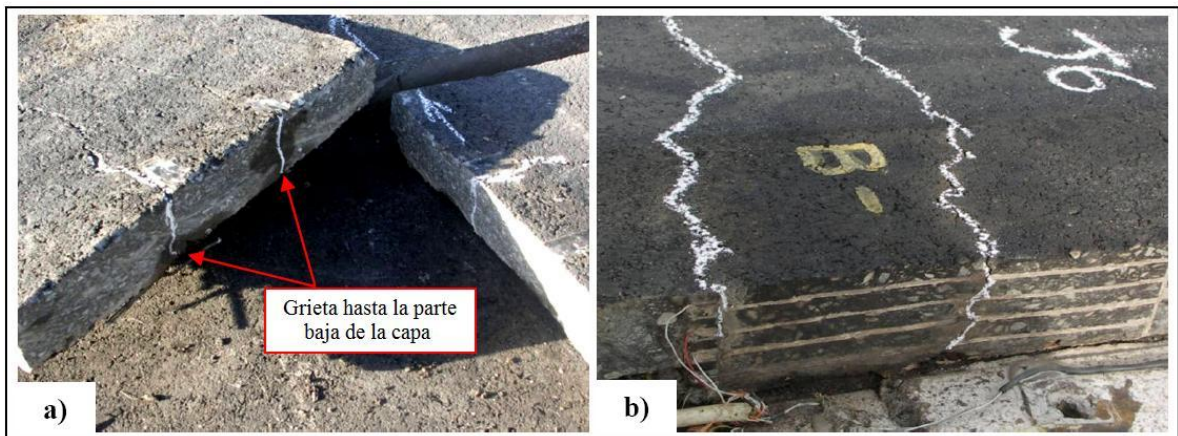
Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

- Serie de pruebas N° 2

Se realizó sobre las juntas N°2 y N° 6. Inició el 14 de junio de 2005 y terminó el 7 de noviembre de 2005 para una duración de casi 5 meses. La fisura superficial se logró evidenciar después de las 452.000 repeticiones pero se llegó a 1 millón para evaluar de la misma forma la degradación posterior a la fisura.

La junta N° 6 presentó el mismo tipo de fisura doble evidenciado en la serie de prueba N° 1. La separación entre las dos fisuras fue de 14 cm y el eje central corresponde al eje de la junta. Las primeras señales de propagación de la fisura se constataron muy rápidamente situándose inicialmente a 0.4 cm de la parte baja de la capa y ascendiendo velozmente hasta que después de las 117.000 repeticiones se ve casi en la superficie.

Figura 4.37. Fisura en la juntas N° 6 a las 452.000 repeticiones



Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

Para la junta N° 2 se generaron problemas con la formulación de la arena asfáltica que desencadenaron resultados de degradación muy prematuros y

comprometieron la veracidad de la prueba tal como se puede evidenciar en la siguiente imagen:

Figura 4.38. Fenómeno ocurrido sobre la junta N° 2



Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

- Serie de pruebas N° 3

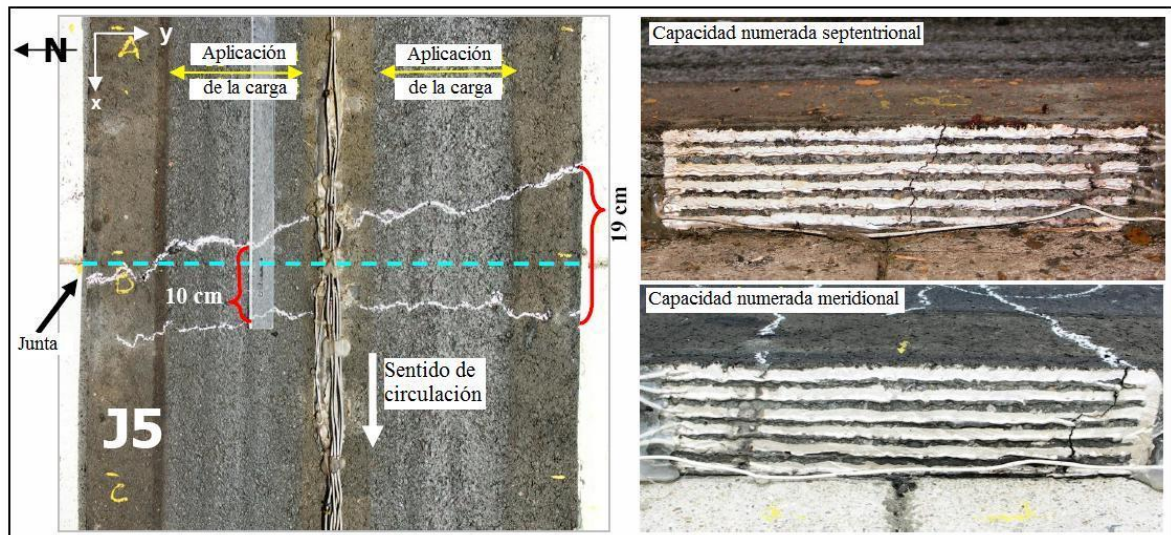
Se llevó a cabo sobre las juntas N° 1 y N° 5. Comenzó el 23 de enero de 2005 y finalizó el 14 de junio de 2006 para una duración de casi 5 meses. Tuvo un paro cuando una de las máquinas tuvo una avería y se tuvo que esperar a arreglarla ya que las dos máquinas debían estar trabajando bajo las mismas condiciones meteorológicas.

La junta N° 5 fue la única que evidenció fisuras iniciando en la parte sur de la capa hacia las 360.000 repeticiones y así fue progresando pero sin lograr llegar a la superficie hasta las 800.000 repeticiones.

Con la experiencia adquirida en las dos primeras series de prueba, se logró que esta tercera suministrara mucha más información mediante un buen comportamiento de la instrumentación, el manejo óptimo de las temperaturas y el hecho de realizar las tensiones en paralelo sobre las dos máquinas.

Luego del paro obligado durante 78 días por la avería de la máquina, se detectó que la fisura había progresado 6 cm sobre el grosor de la capa y se intuyó que las variaciones de temperatura pudieron haber generado esto pero el control de la instrumentación jugó un papel importante.

Figura 4.39. Fisura reflexiva doble sobre la junta N° 5



Fuente: Fuente: Perez Romero, S.A., Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees.

D. Conclusiones de las Series de Prueba

Mediante los resultados obtenidos se determinaron dos análisis del comportamiento de la fisura reflexiva. El primero hace énfasis en el mecanismo de adherencia en las juntas y el segundo en los tipos de estructura utilizados, aunque se debe tener en cuenta para ambos casos la incidencia de la temperatura.

La junta N°5 fue la única de las juntas agrietadas que no presentó una fisura doble paralela a la junta de construcción en la superficie, y se creyó que esto podría ser por el mecanismo de adherencia en las mismas, ya que era el de mejor calidad y por lo tanto, la fisura no se desplazó en relación a la posición de la junta.

A continuación se presenta una clasificación de las juntas agrietadas desde la que presentó el fenómeno de manera más rápida hasta la que no lo presentó, en orden decreciente:

- Junta N° 6.
- Junta N° 3 y N° 7.
- Junta N° 5.
- Junta N° 1 (no presentó).

En todos los casos se pudo identificar que el sentido predominante de propagación de la fisura es de la parte baja hacia arriba. Además se comprobó la presencia de las dobles fisuras reflexivas esperadas para capas bituminosas de bajo grosor ubicadas sobre superficies más rígidas de hormigón⁴⁸.

Según los resultados generales observados se puede decir que la fisura reflexiva es sobre todo sensible a las condiciones de adherencia de las superficies horizontales principalmente, seguido de los materiales antirreflexión de fisuras y finalmente a las condiciones de temperatura. Para poder concluir qué papel juegan las tensiones ocurridas al paso de la carga, es necesario hacer un estudio más

⁴⁸ Zhou F. Y Sun L.; Mechanistic Analysis Of Reflective Cracking And Validation Of Field Test; 2000.

detallado de los valores medidos y ponerlos en paralelo con cálculos numéricos validados.

4.3. PRUEBAS COMPLEMENTARIAS

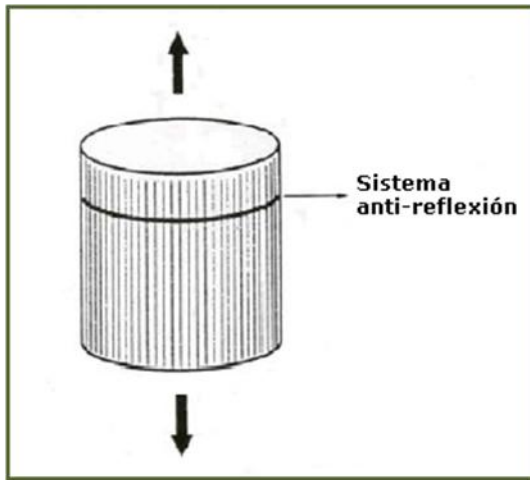
4.3.1. Pruebas de adherencia

Estas pruebas son utilizadas para estudiar la resistencia a la adherencia entre los sistemas antirreflexión y la capa de rodamiento del pavimento. La adherencia será función del método de fijación empleado, la cantidad del producto utilizado y el tipo de sistema interpuesto. En general se usan tres tipos de pruebas: de tracción directa, de extracción del sistema antirreflexión y de corte o cizallamiento.

4.3.1.1. Tracción directa

En las pruebas de tracción directa o tensión simple se estudia la adherencia del sistema antirreflexión con la capa de apoyo y la capa de rodamiento, aplicando tracciones perpendiculares al plano de adherencia. El resultado de esta prueba depende de la temperatura de la prueba y de la velocidad de deformación elegida. La Figura 4.40. presenta un esquema de este tipo de pruebas.

Figura 4.40. Esquema de la prueba de tracción directa

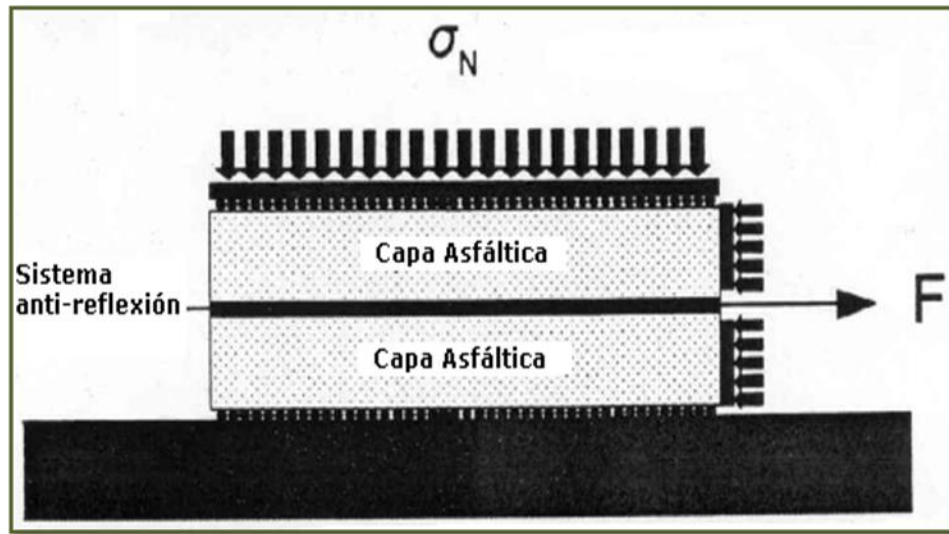


Fuente: Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; Characterization Of Overlay Systems.

4.3.1.2. Prueba de extracción

Las pruebas de extracción comúnmente llamadas “pruebas de pull-out” permiten evaluar la resistencia a la tracción de los sistemas de antirreflexión. Estos tipos de prueba de adherencia consisten en la aplicación de fuerzas de tracción sobre el sistema antirreflexión, paralelas al plano de adherencia, buscando extraer o retirar dicho sistema de entre las capas a las cuales está adherido (Figura 4.41.). Este ensayo está caracterizado por la relación entre la fuerza F aplicada y el deslizamiento de la capa superior en su soporte; con estas pruebas se pueden estudiar aspectos como la resistencia a la tracción de los sistemas antirreflexión así como la cantidad de ligante a utilizar en la adherencia.

Figura 4.41. Esquema de la prueba de extracción



Fuente: Vanelstraete A., d Bondt A.H. & Courard L.; Characterization of overlay systems. *Prevention of Reflective Cracking in Pavements*; 1997. Citado por Florence, C.; Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires.

4.3.1.3. Pruebas de Cizallamiento

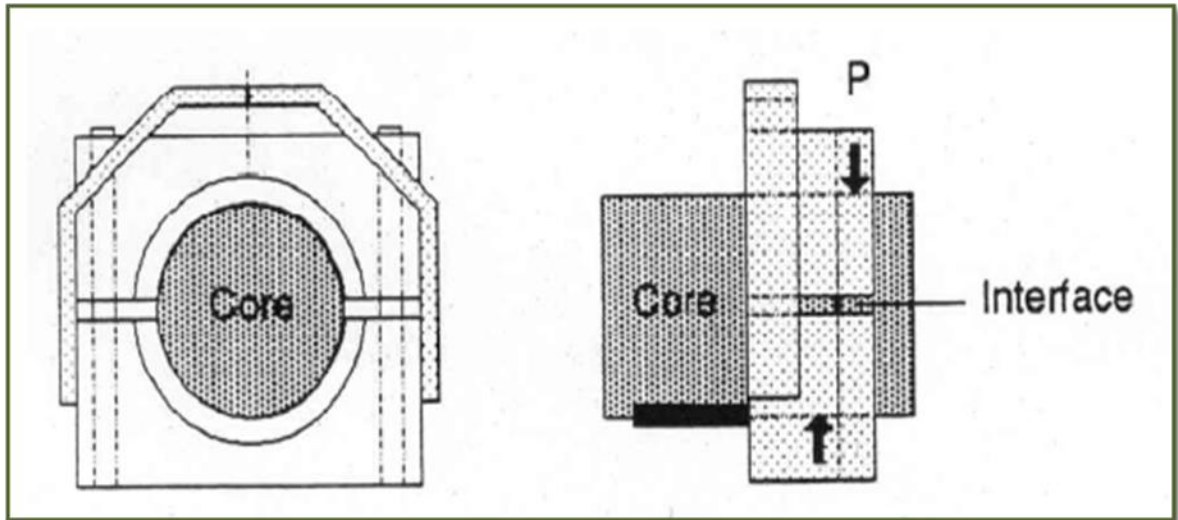
Las pruebas de cizallamiento son dispositivos que buscan establecer la resistencia de la adherencia entre los distintos sistemas antirreflexión de fisuras y la capa de rodadura de un pavimento; en la bibliografía consultada se encontraron dos tipos de pruebas por cizallamiento, pruebas de cizallamiento directo y pruebas de fatiga por cizallamiento.

4.3.1.3.1. Prueba de cizallamiento directo

En las pruebas de corte o cizallamiento se estudia la respuesta de la interacción entre el sistema antirreflexión y la capa de rodamiento a las solicitaciones de

cortante⁴⁹. La información proporcionada por esta prueba es la evolución de la fuerza de cizallamiento ejercida en función del deslizamiento de la parte solicitada sobre la parte fija (Figura 4.42.). El inconveniente de esta prueba es una dispersión no despreciable de los resultados.

Figura 4.42. Principio de la prueba de cizallamiento directo



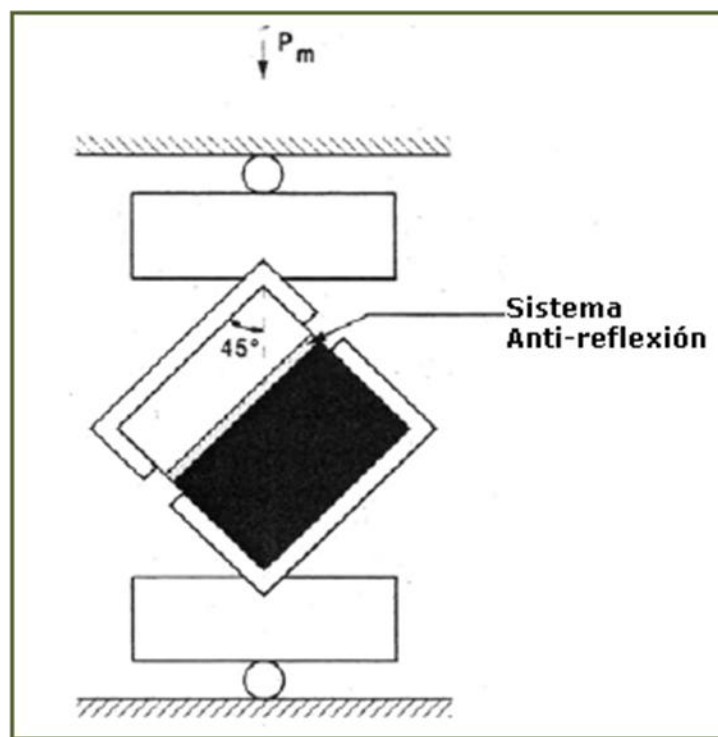
Fuente: Leutner, R.L. Research on adhesion between layers of flexible pavements; 1979. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie.

Es importante destacar que a pesar de la aparente simplicidad de esta prueba, es muy difícil obtener un cizallamiento directo, y a menudo es perturbada por un momento de flexión sobre la superficie cizallada. Simulaciones como la de Bondt [De Bondt; 1994] ponen en conocimiento que la homogeneidad de la distribución es muy dependiente de la rigidez de la zona estudiada. Modificaciones de la prueba de Leutner fueron aportadas por la Universidad de Delft.

⁴⁹Leutner, R.L. Research on adhesion between layers of flexible pavements; 1979. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie;1979.

Entre las pruebas de cizallamiento directo, es necesario citar la prueba desarrollada por la Universidad de Cracovia (Figura 4.43), la cual consiste en aplicar solicitaciones con una componente paralela al plano de adherencia produciendo tensiones de corte en la interface.

Figura 4.43. Prueba de cizallamiento directo



Fuente: Grzybowska, W., Wojtowcz, J. & Fonferko L.; Application of geosynthetics to overlays in Cracow region of Poland; 1993. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie;2002.

PARTE II
METODOLOGÍA PROPUESTA

5. PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO DE UNA PRUEBA DE LABORATORIO QUE DETERMINE LA EFICIENCIA DE LOS DIFERENTES SISTEMAS ANTI-REFLEXIÓN DE FISURAS EN PAVIMENTOS FLEXIBLES

La propuesta de investigación que se presenta a continuación busca simular situaciones reales observadas en pavimentos flexibles de forma tal que se puedan acelerar los efectos y medir resultados de forma rápida y eficaz. Debido a esta característica una experiencia completa tiende a volverse dispendiosa y su veracidad podría quedar en tela de juicio; es por ello que se limitará a evaluar los factores que presentan mayor relevancia.

5.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La propuesta investigativa estará direccionada al estudio de la reflexión de fisuras en pavimentos flexibles a través del análisis del estado del arte sobre el tema orientándose al diseño de una prueba por medio del ensayo de probetas, con el fin de comparar la eficiencia de los distintos sistemas antirreflexión de fisuras, y de esta manera hacer un aporte inicial que promueva la continua investigación del problema que día a día se está presentando cada vez más en las vías urbanas y rurales.

Debido a la poca información sobre la funcionalidad de los distintos sistemas antirreflexión, se ha creado un vacío de conocimiento en cuanto al correcto manejo del problema, ya que la mayoría de investigaciones están basadas en estudios hechos fuera del país o bajo condiciones muy distintas a las que podrían obtenerse en un medio como el de un país tropical.

Es por este motivo que la propuesta investigativa estudiará diferentes métodos de prevención que permitan seleccionar la mejor opción para tratar el fenómeno según las características propias del proyecto a desarrollar.

5.2. ALCANCE

La propuesta de investigación involucra un proceso de laboratorio, en el que se probarán diferentes sistemas antirreflexión de fisuras a través del ensayo de 168 probetas de pavimento flexible, con dimensiones de 1.6m de ancho por 1.6m de largo y espesor variable; se aplicará una carga cíclica de 8.2Ton la cual representa el camión más frecuente que circula por las vías denominado C2G.

5.3. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la propuesta de investigación se propone una metodología útil para la ejecución de la prueba, indicando los parámetros generales del ensayo de laboratorio.

La prueba consiste en aplicar una carga de magnitud 8.2Ton sobre una probeta con o sin sistema antirreflexión de fisuras, por medio de la máquina denominada “Actuador”, adaptada mediante un marco metálico con el fin de poder ensayar cualquier tipo de probeta, a través de un sistema hidráulico monitoreado por un ordenador que permite regular los ciclos de carga necesarios.

Las probetas que se ensayarán constan de una capa de pavimento flexible pre-fisurada, una capa de interposición que comprende geotextiles, geomallas, grillas en fibra de vidrio o una intercapa granular y finalmente una capa de refuerzo también en pavimento flexible. Todos los equipos y materiales que se emplearán para la realización de las probetas de diseño de pavimentos deberán ajustarse a las Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras del INVIAS (I.N.V.).

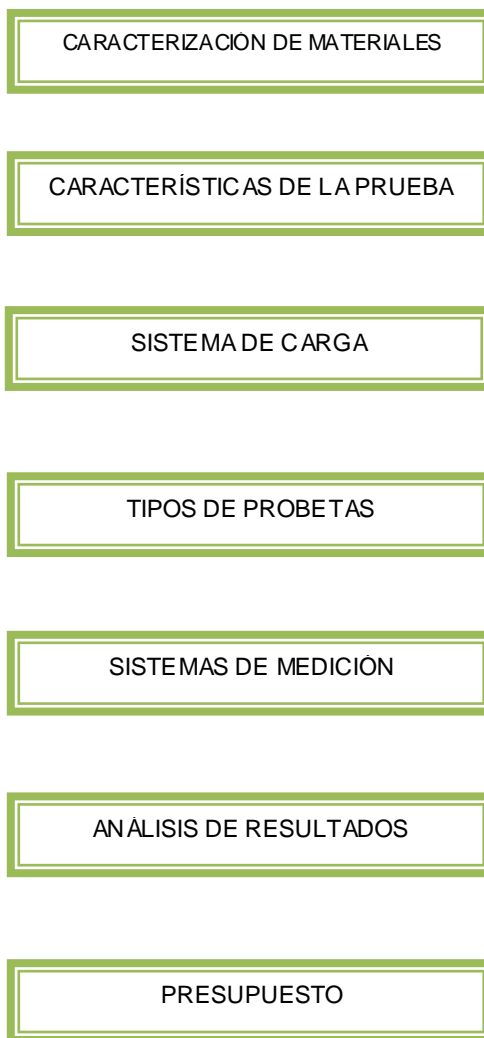
A través del uso de láminas de neopreno de diferentes espesores se simularán tres tipos de suelos: resistente, medianamente resistente y poco resistente, con el fin de poder representar las condiciones reales de una subrasante. Esta subrasante simulada deberá estar unida con resina a una placa metálica empotrada al piso mediante pernos, y la probeta a su vez deberá estar adherida a la lámina de neopreno, para que de esta manera se pueda garantizar una unión completa y no se permita el movimiento de la probeta, lo cual podría generar un rango de error en los resultados obtenidos de los ensayos.

La adaptación de la máquina permitirá ensayar dos probetas al mismo tiempo, una en cada semieje de doble llanta, por lo tanto, se hace la selección de las dos probetas a ensayar y se procede a la aplicación de las solicitaciones, la cual dará el inicio formal de la prueba.

El criterio de terminación del ensayo corresponderá a una inspección visual de la propagación de la fisura en todo el espesor de la probeta; en el momento en que ésta se evidencie en la superficie se dará por terminada la prueba y se harán los respectivos análisis.

La metodología que se propone para el desarrollo de ésta prueba, consta de una las siguientes fases:

Tabla 5.1. Metodología propuesta



5.3.1. Caracterización de materiales

Debido a que la prueba está enfocada a pavimentos flexibles, la mezcla bituminosa que se ensayará en el laboratorio es de tipo MDC-2, la cual corresponde al tipo de estructura más frecuente.

Para la elaboración de las probetas se necesitan varios elementos, en donde a cada uno de ellos deberán realizarse los respectivos ensayos de caracterización:

A. Capa pre-fisurada: Compuesta por la mezclas bituminosa:

- Contenido de vacíos.
- Contenido de asfalto.
- Variación de la rigidez en función de la temperatura de la mezcla.
- Densidad.
- Deformabilidad - rigidez de la mezcla.

B. Sistema de interposición⁵⁰:

- Resistencia a tracción.
- Compatibilidad de adherencia con el ligante.
- Capacidad de absorción del ligante.
- Espesor una vez compactado.

C. Capa de refuerzo: Conformada por la mezcla bituminosa, por lo tanto se realizan los mismos ensayos que en la capa pre-fisurada.

D. Para ligante utilizado como adhesión entre la capa deteriorada, el sistema antirreflexión y la capa de refuerzo, cuando se trate de estructuras compuestas, se deben realizar las pruebas de adherencia para garantizar el buen comportamiento de toda la estructura:

- Tracción directa.
- Prueba de extracción.

⁵⁰ Prieto Muñoz, J. N.; Desarrollo De Un Nuevo Ensayo De Laboratorio Para Medir La Eficacia De Sistemas Antirreflexión De Fisuras En Capas Bituminosas; 2006.

- Pruebas de cizallamiento.

E. Para la variación de las deflexiones será necesario utilizar una subrasante simulada, la cual estará constituida por una lámina de neopreno que contará con dos tipos de espesores. Buscando simular las condiciones más críticas de los suelos se recurrió al uso del programa EVERSTRESS, para hallar las deflexiones de los siguientes suelos:

- Suelo resistente: Módulo de elasticidad $E = 80MPa$
- Suelo medianamente resistente: $E = 50MPa$
- Suelo poco resistente: $E = 20MPa$

Las especificaciones que se tuvieron en cuenta para modelar el suelo fueron:

- Suelo de espesor infinito.
- Carga: 80KN.
- Relación de Poisson: 0.45.
- Módulo de elasticidad: 20MPa, 50MPa y 80MPa.
- Presión de contacto: 483KPa.

Las deflexiones calculadas fueron:

E [Mpa]	Deflexiones [mm]
20	8.84
50	3.54
80	2.21

Las especificaciones de la lámina de neopreno propuesta son:

- Módulos de elasticidad: 1000 Psi – 7MPa.
- Dimensiones: Lámina de 1.28m x 2.08 m.
- Espesores: 3.5 mm y 5 mm.

Para calcular las deflexiones de la lámina de neopreno, se modelaron dos capas con las siguientes especificaciones:

A. Capa Inferior:

- Espesor infinito y rigidez infinita ($E = 1'000000MPa$).
- Relación de Poisson: 0.5.

B. Capa Superior: Modelación de la lámina de neopreno:

- Espesor: Variable.
- Carga: 80KN.
- Relación de Poisson: 0.5.
- Módulo de elasticidad: 7MPa.
- Presión de contacto: 483Kpa.

A través de un proceso iterativo de los espesores de la capa superior se logra encontrar que las deflexiones calculadas sean las mismas deflexiones obtenidas

en la modelación del suelo. Los espesores y deflexiones que permiten la simulación del suelo son:

E [Mpa]	Espesor [cm]	Deflexiones [mm]
7	27	8.71
7	15	3.32
7	12	2.02

5.3.2. Características de la prueba

Para la formulación de la metodología de investigación se tendrán en cuenta las siguientes características:

A. Variación de la abertura de la pre-fisura:

Teniendo en cuenta los niveles de severidad planteados en la Parte I - Capítulo I, se realizarán dos tipos de pre-fisuras a las probetas, a través del uso de una sierra de disco diamantado: aberturas de 2mm y 4mm, correspondiendo a los rangos de los niveles de severidad bajo y medio, respectivamente.

B. Tipo de fisuras:

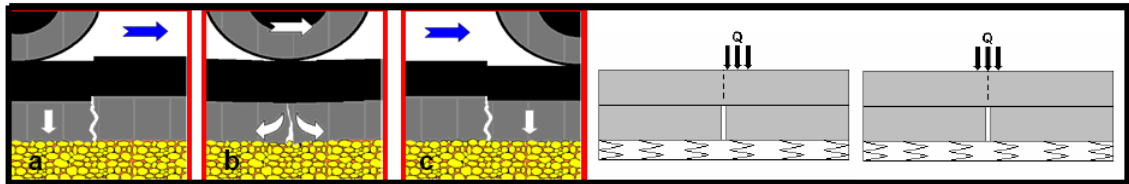
Se evaluarán las dos clases de fisuras aisladas más comunes que se presentan en los pavimentos flexibles: longitudinales y transversales.

C. Clases de solicitaciones:

En esta se prueba se pretende simular los efectos producidos por el paso continuo de las ruedas sobre el pavimento, estas cargas provocan unos movimientos críticos sobre la fisura, que se traducen en solicitaciones tanto de corte como de

flexión. En la Figura 5.1. se representa un esquema de los movimientos generados, en donde a y c corresponden a la sollicitación cortante y b muestra la sollicitación por flexión.

Figura 5.1. Solicitaciones críticas de un pavimento y esquema de aplicación de carga



Fuente: Martins Rodriguez, R.; Montestruque Vilchez, G.; Bloqueo Del Agrietamiento Por Reflejo Con El Uso De Geomalla.

Según lo observado anteriormente, la sollicitación por cortante se presenta dos veces, por lo cual se decidió ensayar las probetas variando la posición de la carga sólo a un lado fisura (cortante) y sobre la fisura (flexión).

D. Parámetros de evaluación:

- Temperatura: Dado que el clima en que se pretende desarrollar esta propuesta no presenta cambios de estaciones y que no cuenta con rangos de temperaturas muy variados, se decidió que no es un factor relevante para el desarrollo del proceso de la reflexión de fisuras; por lo tanto todas los ensayos se realizarán a la temperatura ambiente en que se encuentre el sitio destinado para el laboratorio.
- Cargas de tráfico: Debido a la presencia de gran flujo vehicular, este parámetro se convierte en el factor más influyente en el deterioro de los pavimentos, actuando como un acelerador del proceso de reflexión, razón por la cual se tuvo en cuenta para el desarrollo de la prueba.

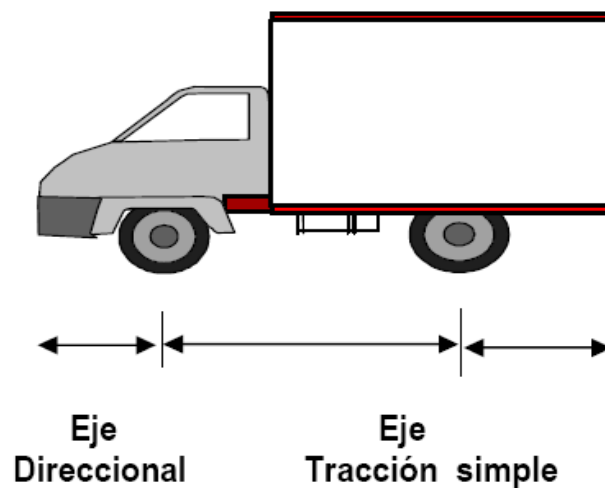
Los mecanismos que se evaluarán en el desarrollo de esta prueba serán:

- Deflexión: Produce una abertura en la fisura generando un aumento en las tensiones y deformaciones horizontales en la base de la capa de refuerzo.
- Movimiento vertical relativo entre los bordes de las fisuras: Genera un cizallamiento que desarrolla tensiones en la capa de refuerzo.

5.3.3. Sistema de carga

La Carga Aplicada para el ensayo de cada una de las probetas será de 8,2Ton (80KN) con el fin de simular la repetición de una carga en un eje simple transmitida al pavimento, repartida en un conjunto de dos juegos de llantas dobles. La configuración del vehículo de carga prototipo, basada en la disposición de los ejes es:

Figura 5.2. Vehículo rígido de dos ejes (C2G)



Fuente: Dirección de Transporte y Tránsito; Parque Automotor de Transporte de Carga en Colombia.

Las dobles llantas equivalen a dos platos circulares con un radio de 115mm espaciados 345mm centro a centro, relacionando 80KN de carga al eje y 483KPa (70PSI) de presión de contacto sobre la superficie.

La distribución de vehículos de carga por configuración y clase de servicio [Parque Automotor de Transporte de Carga en Colombia; 2006], indica que la mayor cantidad de vehículos destinados al transporte de carga corresponde a los vehículos C2G, con 160.641 unidades, es decir, el 83%.

La simulación de la aplicación de carga se realizará a través de la adaptación de un eje con dobles llantas en los extremos que represente las características del camión descritas anteriormente. El eje estará conformado por perfiles metálicos tubulares huecos y las llantas utilizadas deberán ser equivalentes a las de uso diario del camión.

- Adaptación de la máquina “Actuador”

- A. Presentación del Actuador:

- Modelo: Actuador Hidráulico 243.35T MTS.
- Componentes básicos:
- Sistema de distribución hidráulico: Modelo 505.11 Unidad de Poder Hidráulico. 11GPM flujo nominal. 30000PSI. 220VAC, 3PH, 60HZ, Control de 24VDC, enfriado con agua y tanque de 46 galones.
- Actuador estructural: Referencia 243.35T. Aplicaciones de ciclos de fatiga estática o bajo capacidad de fuerza: 54kip en tensión y 82kip en compresión. Desplazamiento de doble amplitud: 10pul (simple amplitud: +/-5 pulgadas).

- Sistema de control electrónico: Controlador digital MTS Flex Test SE es un servo controlador flexible, el modelo básico puede operar stand-alone (sin PC) o con PC automatizado.

Figura 5.3. Vista lateral derecha del Actuador



Figura 5.4. Vista lateral izquierda del Actuador



Fuente: Universidad Industrial de Santander.

B. Adaptación de la máquina:

Para la realización del ensayo de las probetas es necesario trasladar el actuador de su posición horizontal a una posición vertical que permita la aplicación de carga, motivo por el cual se debe construir una estructura metálica que sea lo suficientemente resistente para sostener la máquina. Se estipula un marco metálico de dimensiones aproximadas: 4.8 m de largo por 2.6 m de alto, que utilizará soldadura para unir los elementos que lo conforman y se empotrará a través de pernos al muro que se observa en la Figura 5.6. y al piso.

La estructura estará dotada con un sistema de guaya que permitirá graduar la posición vertical de la máquina y en sus lados contará con unos pasadores que restringirán el movimiento del actuador en el momento de aplicación de la carga. Para variar la posición horizontal de la máquina, se debe recurrir al uso de un riel que se ubicará en la parte superior del marco.

Se adaptará una placa metálica empotrada en los orificios del piso mostrados en la Figura 5.7., a través de pernos, que permitirá garantizar una completa fijación de la probeta evitando el desplazamiento lateral de la misma durante la aplicación de los ciclos de carga; se utilizará una resina para adherir la subrasante simulada (caucho) a la placa.

Figura 5.5. Vista frontal-lateral del muro de empotramiento



Figura 5.6. Orificios para el empotramiento del marco metálico y de la placa metálica

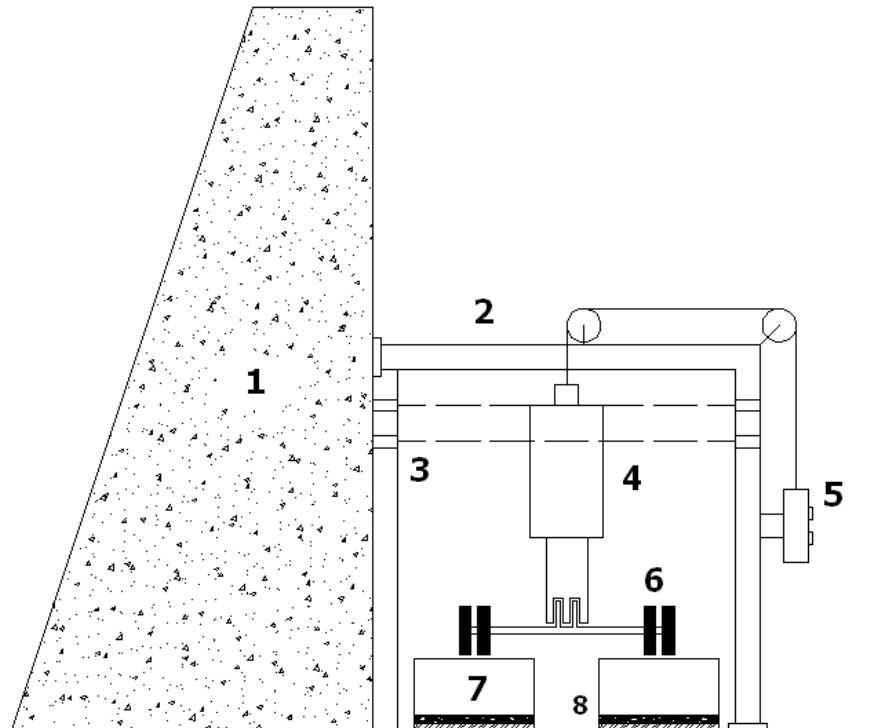


Fuente: Universidad Industrial de Santander.

A continuación se presenta un esquema de la máquina adaptada con el marco correspondiente para la realización de los ensayos, en donde se tiene que:

1. Muro.
2. Marco metálico.
3. Pasadores.
4. Actuador.
5. Sistema de guaya.
6. Simulador de la aplicación de la carga.
7. Probetas.
8. Placa metálica.

Figura 5.7. Esquema de la máquina adaptada para la realización de los ensayos



5.3.4. Tipos de probetas

Se utilizarán dos tipos de probetas:

1. Mezcla bituminosa sin modificar: Se fabricarán 24 probetas con las mismas características, las cuales serán el punto de comparación entre los diferentes sistemas antirreflexión.

Las 24 probetas corresponden a:

- 2 tipos de pre-fisura: 2mm y 4mm.
- 2 tipos de fisura: longitudinal y transversal.
- 2 tipos de sollicitación: cortante y flexión.
- 3 tipos de subrasante: resistente, medianamente resistente y poco resistente.

2. Mezcla bituminosa sin modificar con Sistema de Interposición (Geotextiles, malla de fibra de vidrio, intercapa granular y geomalla): Se probarán dos tipos de geotextiles y dos tipos de geomallas con el fin de realizar una comparación de su eficiencia, por lo tanto el número de probetas corresponderá a 48 para geotextiles y 48 para geomallas. En el caso de la malla de fibra de vidrio y de la intercapa granular, se continuará con el uso de 24 probetas; es necesario que cada grupo de probetas contengan las mismas características de diseño.

Las 48 probetas para los geotextiles y las geomallas corresponden a:

- 2 tipos de pre-fisura: 2mm y 4mm.
- 2 tipos de fisura: longitudinal y transversal.
- 2 tipos de sollicitación: cortante y flexión.
- 3 tipos de subrasante: resistente, medianamente resistente y poco resistente.

- 2 tipos de geotextiles o 2 de geomallas.

Las 24 probetas para la malla de fibra de vidrio y para la intercapa granular:

- 2 tipos de pre-fisura: 2mm y 4mm
- 2 tipos de fisura: longitudinal y transversal.
- 2 tipos de sollicitación: cortante y flexión.
- 3 tipos de subrasante: resistente, medianamente resistente y poco resistente.

Las dimensiones aproximadas que se han propuesto para la construcción de cada una de las probetas a ensayar son: 1.6m de largo por 1.6m de ancho, de espesor variable según el tipo de prueba seleccionada. Para obtener mayor similitud con las condiciones dadas en campo, se aconseja realizar un estudio minucioso para determinar cuáles deberían ser las dimensiones de la probeta que no afectarían la veracidad de los ensayos de laboratorio.

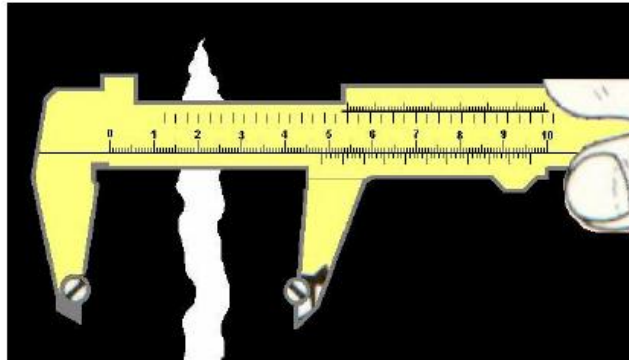
Se deberá tener en cuenta que el espesor de las capas que contengan la mezcla asfáltica será constante, de 5cm en todos los casos.

5.3.5. Sistemas de medición

Los mecanismos de medición que se usarán son los siguientes:

- A. Abertura y cierre: Para medir los movimientos de abertura y cierre de las fisuras se utilizará un sistema de medición que consiste en fijar dos tornillos a lado y lado de la fisura que servirán como guía para la medida de la abertura, a través del uso de un calibrador de alta precisión.

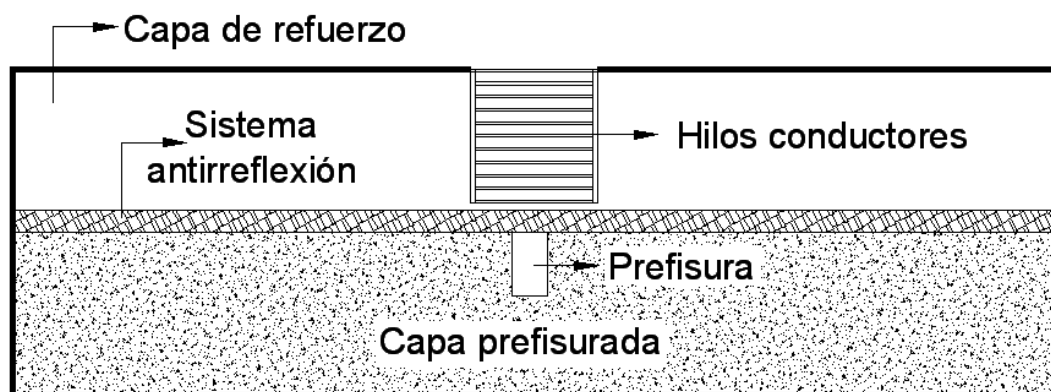
Figura 5.8. Sistema de medición simple



Fuente: Martins Rodriguez, R.; Montestruque Vilchez, G.; Bloqueo Del Agrietamiento Por Reflejo Con El Uso De Geomalla.

B. Propagación de las fisuras: Con el fin de obtener la velocidad de propagación de las fisuras se instalarán unos hilos conductores alrededor de las mismas (ver Figura 5.9.). El mecanismo de funcionamiento consiste en la ruptura de los hilos a medida que la fisura asciende hacia la superficie, generando de esta forma una señal que será captada por un computador.

Figura 5.9. Ubicación de los hilos conductores en la probeta a ensayar



C. Medida de flexiones y cortantes: Para medir las deformaciones por flexión y por cizallamiento producidas por la acción del pistón, se instalará una red de deformímetros tipo LVDT (“Linear Variable Differential Transformers”) tanto en posición horizontal como vertical (intercalando un LVDT vertical y un LVDT horizontal, para un total de 24, 12 de cada uno, separados cada 26cm) como se observa en la Figura 5.10., de modo que se pueda obtener una malla de deformaciones que servirán de apoyo para estudiar internamente el fenómeno que se presenta en la probeta ante la aplicación de la carga.

Para obtener los movimientos relativos de los bordes de la fisura, se instalarán dos LVDTs uno a cada lado de la fisura, éstos indicarán si al momento de la aplicación de la carga se produce un movimiento vertical relativo entre los bordes de la fisura. Cada uno de los LVDTs estará conectado a un ordenador que se encargará de recopilar toda la información de la prueba para su posterior análisis.

Figura 5.10. Distribución en planta de los LVDTs

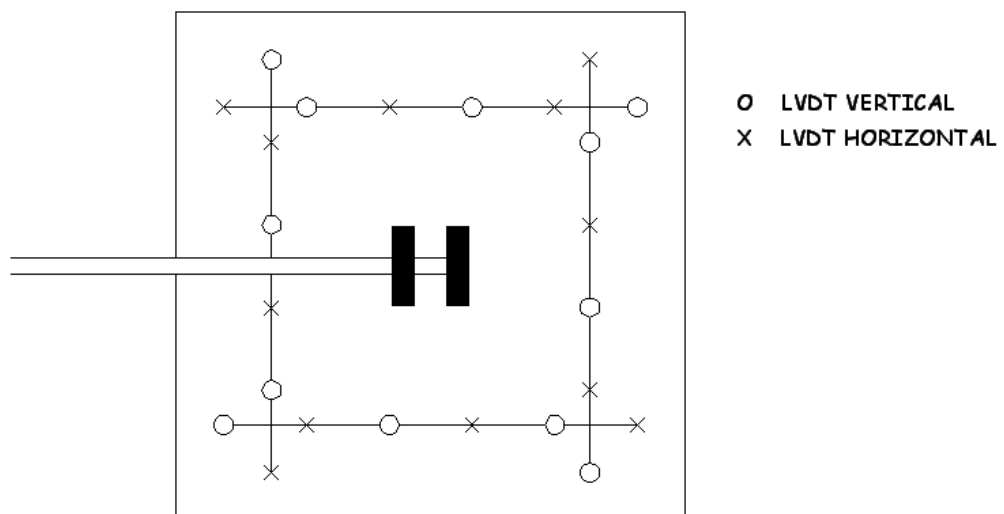


Figura 5.11. Detalle del montaje de los LVDTs

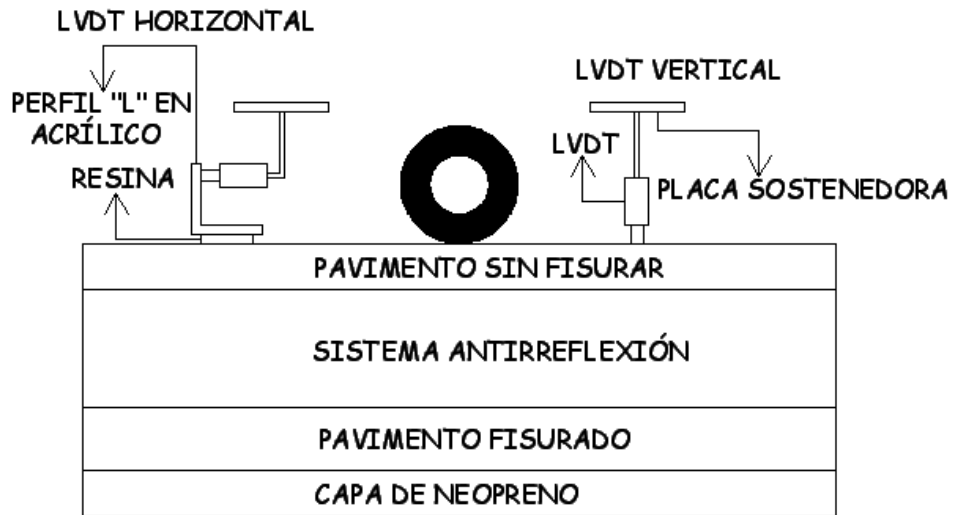
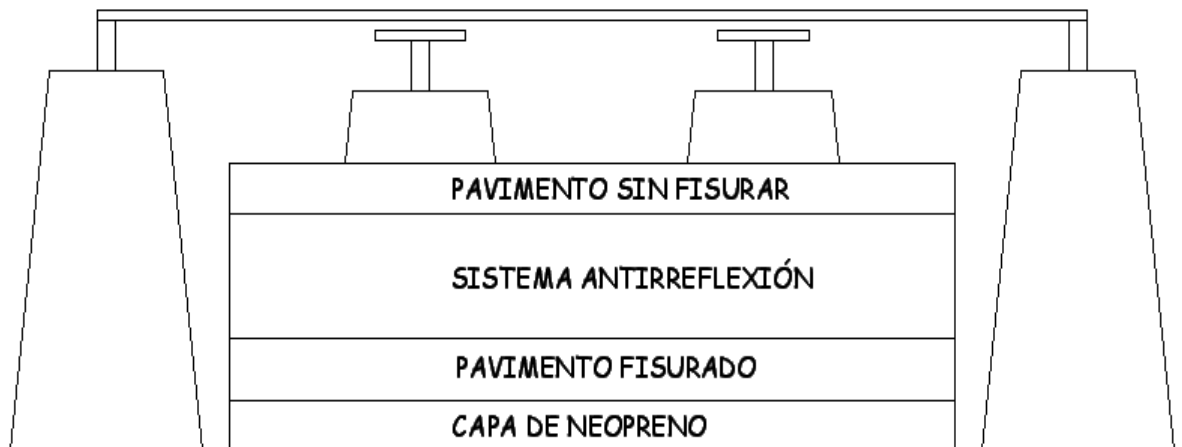


Figura 5.12. Detalle de placas sostenedoras



5.3.6. Análisis de resultados

Con el fin de poder analizar los resultados obtenidos en el ensayo de las probetas, se propone la siguiente Tabla que contenga de manera organizada todos los datos obtenidos durante la prueba:

Tabla 5.2. Características del ensayo de prueba

IDENTIFICACIÓN DE LA PROBETA	GROSOR DE LA CAPA DE CAUCHO		TIPO DE PROBETA		FISURA		ABERTURA		ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA ANTIRREFLEXIÓN	NÚMERO DE CICLOS DE CARGA
	3mm	5mm	Sin Modificar	Con Capa de Interposición	Longitudinal	Transversal	2mm	4mm		

Tabla 5.3. Cuadro resumen de los resultados obtenidos

IDENTIFICACION DE LA PROBETA	ABERTURA Y CIERRE DE FISURA [mm]	VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN [mm/sg]	NUMERO DE CICLOS DE CARGA

Tabla 5.4. Cuadro resumen para los resultados obtenidos de flexiones y cortantes

FLEXIONES Y CORTANTES [mm]					
DEFORMACIONES				MOVS. RELATIVOS	
DEFORMIMETROS VERTICALES		DEFORMIMETROS HORIZONTALES		LECTURA BORDE IZQ.	LECTURA BORDE DER.
1		A			
2		B			
3		C			
4		D			
5		E			
6		F			
7		G			
8		H			
9		I			
10		J			
11		K			
12		L			

La interpretación y clasificación de los sistemas ensayados podrá realizarse de tres distintas maneras:

- A. Número de aplicaciones de carga: Esta clasificación se encuentra directamente relacionado con los resultados obtenidos en el ensayo como la velocidad de propagación, tamaño de la abertura y cierre de la fisura, deformaciones y movimientos relativos, además de ser un indicador directo de la eficiencia de los distintos sistemas antirreflexión probados en el laboratorio. Con estos resultados se podrá realizar un cuadro en donde se clasifiquen los diferentes sistemas ensayados teniendo en cuenta el número de aplicaciones de carga que soportó cada una de las probetas.
- B. Relación beneficio – costo (b/c): Este sistema como su nombre lo indica, plantea una clasificación en función del beneficio que traería implementar una técnica anti-reflejo de fisuras en determinada vía comparado con los costos de su ejecución.
- C. Porcentaje de eficiencia: Esta clasificación aunque es originada por el número de aplicaciones de carga, busca establecer los porcentajes de eficiencia de todos los sistemas antirreflexión de fisuras con respecto al método ensayado que obtuvo los mejores resultados, es decir, el porcentaje de eficiencia del mejor sistema antirreflexión de fisuras con respecto de los demás.

Teniendo estos sistemas de clasificación se podrá determinar la forma más eficiente de tratar el problema de la reflexión de fisuras basados en valores que podrán adaptarse a las especificaciones que se requieran a cada caso en estudio.

Para una segunda fase de investigación se propone realizar el modelamiento matemático del comportamiento de las probetas bajo la aplicación de una carga cíclica, mediante un programa de elementos finitos con el fin de comparar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y de esta manera confirmar la veracidad del ensayo propuesto.

5.3.7. Presupuesto

Para calcular un presupuesto aproximado sobre el costo total de la elaboración de las pruebas, se recurrió a la búsqueda de empresas locales y/o nacionales con el fin de averiguar distintas cotizaciones sobre los materiales y equipos necesarios. La información obtenida fue la siguiente:

A. Subrasante simulada (Neopreno):

Las láminas fueron cotizadas en la empresa “RUBBERTEC Y CIA” con unas dimensiones de 1.28 m x 2.08 m. Los precios de la lámina varían según el espesor requerido:

Grosos (mm)	Precio (\$)
3,5	\$ 105.328
5	\$ 127.600

Se debe tener en cuenta que los precios anotados incluyen IVA pero no transporte, además que el pedido mínimo debe ser de 10 láminas, razón por la cual se aconseja, debido a que las dimensiones de las probetas serán de 1.6 m x 1.6 m, recortar la lámina en el largo para completar el ancho requerido.

La cantidad total de láminas que se necesitan mensualmente, está basada en el hecho que se ensayará un aproximado de 10 probetas por mes, y además que se propone una reutilización de dichas láminas para los ensayos subsiguientes:

Espesor [cm]	Lámina 3.5mm	Lámina de 5mm
27	2	4
15	-	3
12	2	1

Las 10 probetas ensayadas por mes corresponderían a:

- 3 probetas con lámina de neopreno de espesor 27cm.
- 3 probetas con lámina de neopreno de espesor 15cm.
- 4 probetas con lámina de neopreno de espesor 12cm.

Por lo tanto, la cantidad total de láminas de neopreno serán:

Espesor [cm]	Lámina 3.5mm/mes	Lámina de 5mm/mes
27	6	12
15	-	9
12	8	4

Cantidad Total de Láminas	39
----------------------------------	-----------

B. Geotextil No Tejido:

En el mercado actual se pueden encontrar gran variedad de geotextiles que tiene como objetivo cumplir diferentes funciones, para el caso específico de este estudio, es necesario el uso de geotextiles no tejidos específicamente para la repavimentación, por lo tanto, se evaluaron varias propuestas seleccionando la empresa "PAVCO" que ofrece entre sus distintos productos los geotextiles denominados:

- NT REPAV 400 de 3.8m de ancho por 180m de largo a un costo de \$2.420 (\$/m²) sin IVA.
- NT REPAV 450 de 3.8m de ancho por 150m de largo a \$2.875 (\$/m²) sin incluir IVA.

C. Geomalla:

Para el costo de las geomallas también se utilizaron los precios de la empresa “PAVCO” correspondientes a los productos de referencia:

- Geomalla LBO 202 de ancho 3.85m y 100m de largo con un valor de \$4.900 (\$/m²) sin incluir IVA.
- Geomalla LBO 302 de 4m de ancho y largo 75m a un costo de \$9300 (\$/m²) sin IVA.

D. Intercapa Granular:

La intercapa granular está compuesta por agregados de diámetro aproximadamente de 50mm conformando una capa de espesor de 90mm, el costo de este material en el mercado actual es de \$40.000/m³.

E. Mezcla Asfáltica:

El presente costo de la Mezcla densa en caliente MDC – 2, utilizada para la construcción de todas las probetas, se encuentra aproximadamente en \$700.000/m³.

F. Malla de Fibra de Vidrio:

El precio de la malla fibra de vidrio se determinó en \$18.600/m².

G. Tarifa de Arrendamiento del Equipo de Laboratorio:

Para el cálculo del arrendamiento de la maquinaria se tomó como base el manual de Tarifas de Arrendamiento para Equipos de Construcción de la Asociación Colombiana de Ingenieros edición 1993 actualizando precios y salarios.

Vale la pena anotar que en el precio total de la maquinaria en arriendo se tendrán en cuenta los costos de los LVDT, de los hilos conductores y de la placa metálica, de tal forma que el ensayo cuente con todos los elementos necesarios para cumplir a cabalidad el procedimiento propuesto.

De igual manera se incorporó la Tasa de Cambio Representativa del Mercado (TRM) con un valor de \$2.100 pesos, ya que se consideró que en el momento de esta investigación era un valor promedio según la variación que presentaba, y el Salario Mínimo Mensual Legal Vigente (SMMLV) se tomó con un valor de \$461.500 pesos ya que fue el valor estipulado para el año 2008.

A continuación se presentará el proceso de cálculo paso a paso, según el manual propuesto:

a) Costos del equipo:

El costo total del equipo se calculará teniendo en cuenta los siguientes ítems:

Actuador	\$ 260.000.000
LVDTs	\$ 1.700.000
Hilos	\$ 1.300.000
Marco	\$ 10.000.000
Eje y placa	\$ 2.000.000
Total	\$ 275.000.000

El marco al que se hace referencia es el necesario para adaptar la máquina de forma que pueda ejercer la fuerza verticalmente, igualmente el eje y placa mencionados en el recuadro son los aditamentos que serán utilizados para la transferencia de carga y la fijación y adherencia de la probeta respectivamente.

b) Vida económica útil:

Ya que no se encontró información detallada se decidió asimilar la vida útil a la de un vibrador para concreto, la cual está estipulada en 6.000 horas ó 3 años.

c) Costos de propiedad:

Valor de rescate (50%)	\$ 137.500.000
Valor Depreciable	\$ 137.500.000

Teniendo en cuenta el valor depreciable y considerando un valor de rescate del 50% del costo total del equipo se determina un valor depreciable por hora trabajada:

$$\frac{\text{Valor depreciable}}{\text{Vida útil}} = \frac{137.500.000}{6.000} = \$22.917 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Ecuación (5.1) Valor depreciable por hora del equipo

Para una vida útil de 3 años se propone un factor de costo de propiedad (factor C) de 0.31167 teniendo en cuenta los siguientes valores anuales:

Interés comercial	36%
Impuestos sobre capital	1,80%
Prima de seguros	3,20%
Bodegaje	2,50%

De esta manera se tiene que:

$$C.P = \frac{\text{Factor C} \times \text{Valor depreciable}}{1000} = \frac{0.31167 \times 137.500.00}{1000}$$

Ecuación (5.2) Factor C

$$C.P = \$42.855 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

d) Costos de operación:

Se estimó un jornal de \$20.000 pesos para un operario y un laboratorista, con un factor salarial de 2.71, de tal forma que:

$$\text{Costo Operario} = \frac{2 \times 20.000 \times 2.71}{8} = \$13.550 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Ecuación (5.3) Costo Operario

Para el consumo horario de electricidad se estimó un valor de \$5.000 pesos por hora y para el aceite hidráulico se tomó un factor de consumo de galones por hora de 0.03 y un valor de \$80.000 pesos por galón. El costo de filtros, tanqueo y lubricación se consideró del 20% de la suma de los valores mencionados anteriormente de la siguiente manera:

$$\text{Filtros, tanqueo y lubricación} = 0.2 \times [(0.03 \times 80.0000) + 5.000]$$

Ecuación (5.4) Costo de filtros, tanqueo y lubricación

$$\text{Filtros, tanqueo y lubricación} = \$1.480 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Para el costo de reparaciones se eligió el 90% del costo de depreciación horario, del cual el 25% será de mano de obra y el 75% restante de repuestos, valor que para Colombia parece razonable subirle un 50% debido a que los repuestos serán importados, obteniendo así:

$$\text{Reparaciones} = 0.9 \times [0.25 + (0.75 \times 1.5)] \times 22.917 = \$28.359 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Ecuación (5.5) Costo de reparaciones

El siguiente es un cuadro resumen de los costos horarios recolectados para los costos de operación:

Operador	\$ 13.550
Electricidad	\$ 5.000
Aceite hidráulico	\$ 2.400
Filtros, tanqueo y lubricación	\$ 1.480
Reparaciones	\$ 28.359

e) Administración, imprevistos y utilidades (A.I.U):

Para el costo total horario de arrendamiento se sumaron los valores calculados de la siguiente forma:

$$42.855 + 13.550 + 5.000 + 2.400 + 1.480 + 28.359 = \$93.644 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Tomando un A.I.U del 35% el valor del arrendamiento por hora será de:

$$93.644 \times 1.35 = \$126.419 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Para la asignación del valor de arrendamiento del laboratorio se acudió a la opinión de personas experimentadas en el tema que aconsejaron tomar una cuantía de \$1.500.000 mensuales, por concepto del préstamo del espacio físico necesario para realizar los ensayos. Con la ayuda de este valor, se puede obtener una tarifa de arrendamiento horaria total de la siguiente manera:

$$\frac{1.500.000}{8 \times 24} + 126.419 = \$134.232 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}}$$

Asumiendo un tiempo total de realización de todos los ensayos de un año y medio, el costo total del arrendamiento del equipo de laboratorio es de:

$$\text{Horas} = 8 \text{ horas diarias} * 24 \text{ días} * 18 \text{ meses} = 3456 \text{ horas}$$

$$\text{Costo Total Arrendam.} = \$134.232 \frac{\text{pesos}}{\text{hora}} * 3456 \text{ horas} = \$ 463.905.792$$

Tabla 5.5. Presupuesto de la metodología propuesta

MATERIALES	UNID	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	COSTO TOTAL	OBSERVACIONES
Caucho	UN	25	\$ 127,600	\$ 3,190,000	Espesor 5mm; 1.28m x 2.08m
Caucho	UN	14	\$ 105,328	\$ 1,474,592	Espesor 3.5mm; 1.28m x 2.08m
Mezcla Asfáltica	m ³	47.31	\$ 700,000	\$ 33,116,160	Mezcla 60 - 70; desperdicio 10%
Geotextil No Tejido	m ²	684	\$ 2,807	\$ 1,920,125	PAVCO NT REPAV 400
Geotextil No Tejido	m ²	570	\$ 3,335	\$ 1,900,950	PAVCO NT REPAV 450
Geomalla	m ²	385	\$ 4,900	\$ 1,886,500	LBO 202
Geomalla	m ²	300	\$ 9,300	\$ 2,790,000	LBO 302
Malla de fibra de vidrio	m ²	450	\$ 18,600	\$ 8,370,000	
Intercapa Granular	m ³	6.1	\$ 40,000	\$ 244,000	Φ 50mm, Espesor 90mm; desperdicio 10%
EQUIPO	UNID	HORAS	COSTO (\$/HORA)	COSTO TOTAL	OBSERVACIONES
Equipo de laboratorio	Horas	3456	\$ 134,232	\$ 463,905,446	Incluye maquinaria de ensayo y préstamo de lab

COSTO TOTAL DEL ENSAYO	\$ 518,797,773
-------------------------------	-----------------------

6. CONCLUSIONES

- El fenómeno de la reflexión de fisuras en pavimentos flexibles constituye uno de los principales problemas de deterioro de las redes viales de la mayoría de los países del mundo, esto ha generado una necesidad creciente en el desarrollo de nuevas técnicas de mantenimiento y reparación de las calzadas. En un contexto donde se tienen dificultades de carácter socio-económico, político, medioambiental, etc., se hace cada vez más exigente el desarrollo de soluciones innovadoras, convenientes, resistentes y perdurables en el tiempo.
- Todo el proceso de recopilación de información pone de manifiesto la insuficiente investigación que se ha realizado acerca del tema en estudio en el país. El trabajo que aquí se presenta busca impulsar el desarrollo de nuevas metodologías para la investigación del fenómeno de la reflexión de fisuras, con el fin de iniciar una cadena de estudios que conduzcan al desarrollo e implementación de nuevas técnicas de mantenimiento vial.
- Esta investigación se centró en el análisis de las técnicas de mantenimiento de calzadas semi-rígidas y bituminosas deterioradas en sus capas bases. En la práctica se aplican diversos sistemas para tratar el fenómeno de la reflexión, cada uno de los cuales ha sido desarrollado teniendo en cuenta las condiciones propias de su entorno, siendo éste un factor determinante para cada caso de análisis, así como lo fue para la elaboración del presente estudio.
- La reflexión de fisuras en capas bituminosas tiene su origen en los movimientos de los bordes de las mismas, causados por el paso constante de tráfico, los cambios de temperatura y la variación del contenido de agua en el suelo, acelerando el deterioro en las capas inferiores del pavimento provocando la desestabilización de toda la estructura.

- Para retardar la aparición de las fisuras reflexivas en la superficie de las capas de refuerzo, se han propuesto distintos sistemas antirreflexión que tienen como propósitos proveer –entre la capa bituminosa de refuerzo y la superficie fisurada- una capa flexible que pueda deformarse sin romperse, que absorba las tensiones y deformaciones producidas por las cargas de tráfico y por las variaciones térmicas, y que funcione como refuerzo de la capa bituminosa, impidiendo o retardando la aparición de las fisuras en la superficie del pavimento. Según la bibliografía consultada, se encontraron diversas técnicas antirreflexión de fisuras, tales como el pre-fisuramiento de las bases estabilizadas con cemento, corte y sellado de fisuras, lechadas asfálticas, capas con sistemas de interposición –geotextiles, geomallas, grilla de fibra de vidrio, membranas absorbentes de tensión (Sistema SAMI), intercapas granulares (arena-betún)– y mezclas asfálticas modificadas, entre otros, que han demostrado buenos resultados al utilizarlos en calzadas reales.
- La metodología de investigación que se propone aquí busca simular de forma simultánea las sollicitaciones debidas a las cargas de tráfico, las cuales representan la principal causa de la reflexión de fisuras en los pavimentos del país. Estas sollicitaciones son:
 - Deflexión: Produce una abertura en la fisura generando un aumento en las tensiones y deformaciones horizontales en la base de la capa de refuerzo.
 - Movimiento vertical relativo entre los bordes de las fisuras: Genera un cizallamiento que desarrolla tensiones en la capa de refuerzo.
- Con la realización de esta investigación se hará un avance tecnológico en materia de mantenimiento vial, ya que se podrá contar con un análisis comparativo de los sistemas antirreflexión de fisuras, el cual servirá de orientación a los interesados a la hora de tomar una decisión sobre cuál es el mejor sistema que se ajusta las particularidades de cada caso.

7. RECOMENDACIONES

A partir del trabajo realizado en el presente informe se pretende que el fenómeno de la reflexión de fisuras en pavimentos flexibles se convierta en uno de los temas de investigación de mayor importancia en la ingeniería de pavimentos y de esta manera poder fortalecer los estudios que se encuentren en desarrollo.

De otra parte se plantean futuras investigaciones que tengan como base el presente trabajo, entre las que se pueden mencionar:

- Realizar una segunda fase de esta investigación, con el objetivo de modelar matemáticamente el comportamiento de las probetas bajo la aplicación de una carga cíclica, mediante un programa de elementos finitos con el fin de confirmar la veracidad del ensayo propuesto.
- Efectuar un estudio que permita establecer las dimensiones más adecuadas de la probeta a ensayar para que de esta manera se puede modelar de forma más real la estructura de los pavimentos y por lo tanto se puedan obtener resultados aún más confiables.
- Desarrollar un índice de correlación entre los resultados obtenidos en laboratorio y las condiciones previstas en campo, que permita determinar la incidencia de un sistema antirreflexión en la vida útil de una capa de refuerzo.
- Establecer un índice de resistencia a la reflexión de fisuras que pueda servir de apoyo para las comparaciones de los distintos sistemas ensayados, así como estudiar la posibilidad de incluirla como un parámetro de diseño de las capas asfálticas de refuerzo.

BIBLIOGRAFÍA

6dsolutions; "Roadtex, Rotaflex Et Cidex : Grilles De Fibre De Verre Pour Renforcement D'enrobé"; 2001.

Alió, E.; "Refuerzo De Carpeta De Repavimentación Con Malla De Poliester", Boletín Técnico Del Instituto Del Asfalto, Números 7 Y 8, Caracas, Venezuela, Julio Y Agosto 2000.

Alimami, M; "Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux; 1988. Citado por: Laveissiere, D.; "Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie";1988.

Al-Qadi, I. L.; "Reflective Cracking: Initiation And Propagation Mechanisms", University Of Illinois At Urbana-Champaign, August, 2007.

Alvarez Loranca, R. L., Jefe Del Area De Gestión De Infraestructuras Geocisa; "La Importancia De La Inspeccion Visual En Los Problemas De Patologia De Carreteras".

Amini, F.; "Potential Applications Of Paving Fabrics To Reduce Reflective Cracking", Department Of Civil & Environmental Engineering, Jackson State University, Jackson, Mississippi, February, 2005.

Asefma; "Desarrollo De Una Gama De Productos A Base De Betún Modificado Con Polvo De Neumáticos. Casos Prácticos.", España.

Asphalt Rubber Technology Service; “Stress Absorbing Membrane Interlayer (Sami)”, Clemson University, Clemson.

Ayenu-Prah, A., Attoh-Okine, N., Hindawi Publishing Corporation, “Evaluating Pavement Cracks With Bidimensional Empirical Mode Decomposition”, Eurasip Journal On Advances In Signal Processing Volume 2008, Article Id 861701, Delaware, Newark, Septiembre 5, 2007.

Bitumix Cvv, Dpto. Gestión De Calidad Y Desarrollo; “Adecuado Sellado De Grietas En La Mantenición De Pavimentos”, Septiembre, 2005.

Botasso G.; González R.; Rodríguez, P.; “Selladores Asfálticos De Producción Nacional”, Universidad Tecnológica Nacional –Facultad Regional La Plata - Lemac - Área Materiales Viales, La Plata.

Botasso, G.; Fensel, E.; Ricci, L.; “Caracterización De Geosintéticos Para Uso Vial”, Lemac: Centro De Investigaciones Viales, Utn Facultad Regional La Plata.

Botasso, G.; Fensel, E.; Sassara, L.; “Metodo Para Medir Capacidad De Retencion De Asfalto En Geosinteticos”, Lemac, Utn La Plata, Argentina.

Centro De Estudios Y Experimentación De Obras Públicas; “Manual De Empleo De Caucho De Nfu En Mezclas Bituminosas”, España, Mayo, 2007.

Clauwaert, C. & Francken, L.; “Etude et observation de la fissuration réfléctive au Centre de Recherches Routières belge;1989. Citado por: Laveissiere, D.; “Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie”; 2002.

Clemson University; "Stress Absorbing Membrane Interlayer (SAMI)"; Asphalt Rubber Technology Service, Clemson, 2002.

Cleveland, G. S.; Button, J. W.; Lytton, R. L.; "Geosynthetics In Flexible And Rigid Pavement Overlay Systems To Reduce Reflection Cracking", Texas Transportation Institute The Texas A&M University System College Station, Texas, October, 2002.

Colombier, G.; "Cracking In Pavements: Nature And Origin Of Cracks", Belgian Road Research Centre, Bruselas.

Composan; "Geotesan Ntcr", España.

Composan; "Sistemas Por Campos De Aplicación", España.

Consejo De Directores De Carreteras De Iberia E Iberoamérica; "M5.1. Catálogo De Deterioros De Pavimentos Flexibles", Volumen N° 11, 2002.

Covarrubias, J.P.; "Disminución Del Alabeo En: Pavimentos Urbanos Y Pisos Industriales De Hormigón", Santiago, 2005.

De Bondt, A. Y Scarpas, A.; "Reflective Cracking,Control Via Stress-Relieving Systems"; Liege, Bélgica, 1996.

De Carvalho, M. D.; Recuperación De Carreteras Y Vias Urbanas Con La Técnica Del Whitetopping", Asociación Brasileira De Cemento Pórtland, Guatemala, Abril, 2007.

Département Génie Civil Et Pistes Du Stba, "Techniques Anti-Remontées Des Fissures, Guide D'emploi En Chaussées Aéronautiques", Avril, 1999.

Department Of Defence, "Aircraft Pavement Maintenance Manual", Julio, 2003.

Dumas, Ph Y Vecoven, J.; "Processes Reducing Reflective Cracking"; Liege, Bélgica, 1993.

Estudio E Investigación Del Estado Actual De Las Obras De La Red Nacional De Carreteras, Convenio Interadministrativo 0587 – 03, "Manual Para La Inspección Visual De Pavimentos Flexibles", Bogotá, D.C, Octubre De 2006.

FHWA; "Potential Applications Of Paving Fabrics To Reduce Reflective Cracking"; 2005.

FHWA; "PCC Pavement Evaluation And Rehabilitation"; 2001.

Florence, C., "Etude Experimentale De La Fissuration Reflective Et Modelisation De La Resistance De Structures Cellulaires", Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussées, 14 Abril, 2005.

Francken, L., Vanelstraete, A. Y Bondt, A.; "Modeling And Structural Design Of Overlay Systems"; Belgian Road Research Centre, Bruselas, 1997.

Gallego Medina, J., Doctor Ingeniero De Caminos, Canales Y Puertos Profesor Titular De Universidad Universidad Politécnica De Madrid; "Rehabilitación De Pavimentos Rígidos Con Betún De Alto Contenido De Caucho. Ejemplos En Una Autopista Española."

Garnica Anguas P., Gómez López J.A., Delgado Halamilla, H., Instituto Mexicano Del Transporte, Secretaría De Comunicaciones Y Transportes, "Algunos Aspectos

De La Densificación De Mezclas Asfálticas Con El Compactador Giratorio”,
Publicación Técnica No. 228, Sanfandila, Qro, 2003.

Garnica Anguas, P.; Delgado Alamilla, H.; Gómez López, J. A.; González Madrigal,
A.; “Comportamiento De Mezclas Asfálticas Modificadas Con Sbr”, Publicación
Técnica No 254, Sanfandila, Qro, 2004.

Geosintéticos Pavco; “Geomallas Mono-Orientadas”, Colombia, Septiembre, 2005.

Geosintéticos Pavco; “Geotextiles Tejidos”, Colombia, Septiembre, 2005.

Grzybowska, W., Wojtowcz, J. & Fonferko L.; “Application Of Geosynthetics To
Overlays In Cracow Region Of Poland”; 1993.

Guissi G.; “La Remontée Des Fissures Dans Les Re-Surfaçages : Développement
D’une Méthodologie De Conception Des Re-Surfaçages”; 2005.

Hutter, W., “Crack Reduction Strategies On A Pavement Warranty Project
(Interstate 25 At Fountain, Colorado)”, Colorado Department Of Transportation
Research Branch, Report No. Cdot-Dtd-R-2003-5, Marzo, 2003.

Instituto Mexicano Del Cemento Y Del Concreto (Imcyc); “El Concreto En La
Obra”.

Jofré, C.; Fernández, R.; “El Empleo De Pavimentos De Suelocemento En
España”, Asamblea Ficem, 2004.

Laveissiere, D., “Modelisation De La Remontee De Fissure En Fatigue Dans Les
Structures Routieres Par Endommagement Et Macro-Fissuration, De

L'experimentation A L'outil De Dimensionnement Pour L'estimation De La Duree De Vie”, L'universite De Limoges Faculte Des Sciences Ecole Doctorale Sts, 2002.

Leutner, R.L.; “Reaserch On Adhesion Between Layers Of Flexible Pavements”; 1979.

Luis Felipe Correales Rivas, “Uso Adecuado De Geomallas Y Geotextiles En Ingeniería De Pavimentos Flexibles”, Cámara De Construcción De Quito, Diciembre 2, 2005.

Martins Rodriguez, R.; Montestruque Vilchez, G.; “Bloqueo del agrietamiento por reflejo con el uso de geomalla”, Centro Técnico Aeroespacial – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Brasil, 2001.

Maxim Technologies Incorporated, “Nonwoven Pavement Fabrics Study, Final Report”, Austin Texas, Diciembre, 1997.

Meunier, M.; Perraton, D.; “La Remontée Des Fissures Dans Les Systèmes De Resufaçaage. Une Nouvelle Méthode D’essai En Laboratoire”, Université Du Québec, Québec, 2005.

Ministerio De Transporte República De Colombia, Dirección De Transporte Y Tránsito, Subdirección De Transporte, Grupo De Investigación Y Desarrollo En Transporte; “Parque Automotor De Transporte De Carga En Colombia”, Bogotá, Octubre, 2006.

Molenaar, A.; Evaluation Of Pavement Structure With Emphasis On Reflective Cracking; Liege, Bélgica, 1983.

NAPA; "Guidelines For Use Of HMA Overlays To Rehabilitation PCC Pavements", Beltsville, Maryland, USA.

Nernas, K.; Nunn, M.; "A Model For Top-Down Reflection Cracking In Composite Pavements", Cracking In Pavements – Mitigation, Risk Assessment And Prevention, Crowthorne, UK.

Pais, J.; "Evaluation Of Reflective Cracking Resistance In Bituminous Mixtures"; Ottawa, Canada, 2000.

Pais, J.C. & Pereira, P.; "Evaluation Of Reflective Cracking Resistance In Bituminous Mixtures"; 2000.

Pardo Rojas, M. A.; Canata Zaror, M. T.; "Malla Metalica Para La Reflexion De Grietas En Recapados Asfaltico", Universidad De Concepción, Chile.

Pavco; "Geosistemas. Recomendaciones Constructivas Y De Diseño", Colombia.

Pavco; "Lista De Precios De Geomallas", Colombia, Noviembre 1, 2007.

Pavco; "Lista De Precios Geotextiles Tejidos Y No Tejidos", Colombia, Noviembre 10 2007.

Pavco; "Refuerzo En Vías Con Geotextil", Colombia.

Pérez González, F.; Del Val Melús, M. A.; "La Fisuración Térmica De Los Pavimentos De Mezcla Bituminosa", Revista De Obras Publicas. N° 3.338. Año 141. Diciembre, 1994.

Pérez Jiménez, F. E.; Asefma; “Ensayos De Mezclas Bituminosas.Criterios De Diseño. Nuevas Propuestas”, Catedrático De Caminos Universitat Politècnica De Catalunya.

Perez Romero, S.A., “Approche Experimentale Et Numerique De La Fissuration Reflective Des Chaussees”, Universite De Limoges, Faculte Des Sciences Et Techniques, 2007.

Pérez, S., Munevar, S., “Primera Experiencia Colombiana Con El Carrusel De Fatiga”, Dirigido Por Ing. Phd Bernardo Caicedo, Universidad De Los Andes, Departamento De Ingeniería Civil, Bogotá, D.C, 2000.

Potgieter, C.J.; “Road Pavement Crack Sealing: Experiences In The Republic Of South Africa”, Potgieter Hattingh And Raspi Inc., Randburg Waterfront, South Africa.

Pouteau, B., Balay, J.-M., Chabot A.& De Larrard F.; “Fatigue Test And Mechanical Study Of Adhesion Between Concrete And Asphalt”; 2004.

Prieto X., Gerente General Prieto Y Trudon Ltda.; “Grillas De Fibra De Vidrio Mejoran Resistencia: Santiago Sin Espaldas Encorvadas”, Marzo 2003.

Prieto Muñoz, Jorge N., “Desarrollo de un nuevo ensayo de laboratorio para medir la eficiencia de sistemas antirreflexión de fisuras en capas bituminosas”, Departamento de Ingeniería Civil-Transportes E.T.S. de ingenieros de caminos, canales y puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

Problemas, Causas Y Soluciones”, Sección Coleccionable 7, Mexico.

Rababaah, H., Vrajitoru, D., Wolfer, J., "Asphalt Pavement Crack Classification: A Comparison Of Ga, Mlp, And Som", Computer And Information Sciences, Indiana University South Bend.

Ramirez Viscarra, J. M.; "Tratamiento De Fisuras En Carpetas Asfálticas", Instituto De La Construcción Y Gerencia.

Rico Rodríguez, A., Téllez Gutiérrez, R., Garnica Anguas, P., Instituto Mexicano Del Transporte, Secretaría De Comunicaciones Y Transporte, "Pavimentos Flexibles. Problemática, Metodología De Diseño Y Tendencias.", Publicación Técnica No. 104, Sanfandila, Qro, 1998.

Rigo, J., M., Cescotto, S. y Kuck, P., J.; "Evaluation Of Crack Propagation In An Overlay Subjected To Traffic And Thermal Effects"; Liege, Bélgica, 1993.

Schvartzer, F.; "Innovaciones Tecnológicas Viales En Mantenimiento", Simposio Mantenimiento Vial.

Secretaría De Integración Económica Centroamericana (Sieca), "Manual Centroamericano De Mantenimiento De Carreteras", Guatemala, 2.000.

Secretaría De Integración Económica Centroamericana (Sieca), "Manual Centroamericano Para Diseño De Pavimentos", Guatemala, Noviembre, 2.002.

Soto Sánchez, J. A., Director Técnico Cepsa Proas Zaragoza; "“Vida Útil”. Necesidad De Rehabilitación Con Soluciones Innovadoras", 14 De Diciembre, 2006.

Sousa J.B., Pais J.C. & Stubstad R.N.; "Mode of loading in reflective and flexural fatigue cracking – A Numeric Evaluation; 2000.

Sposito, B., Brooks, E., "Geosynthetics For Reflective Crack Control, Construction Report", State Research Project Number 537, Salem, Or, Marzo, 1999.

Tadeu Balbo, J.; Pimentel Cintra, J.; "Fatigue Verification Criteria For Semi-Rigid Pavements", Escola Politécnica Da Universidade De São Paulo, São Paulo, Brasil.

Tensar International; "Glasgrid. Pavement Reinforcement System", Atlanta, Georgia.

Tie He, Research Division Chief New Ndot Research Projects, "Research And Technology Review", Volume 17 Issue 2, 2008.

Timaná Rojas, J.; "Tecnología De Pavimentos", Universidad De Piura, Lima, Perú.

Titi, H., Rasoulían, M., Martínez, M., Becnel, B. Y Keel, G.; "Long-Term Performance Of Stone Interlayer Pavement"; Journal Of Transportation Engineering, 2003.

Vanelstraete, A., De Bondt, A. y Courard, L.; "Characterization Of Overlay Systems"; Belgian Road Research Centre, Bruselas, 1997.

Vásquez Torres, L. C.; Vásquez Varela, L. R.; "Refuerzos Granulares: Modelación Y Seguimiento Del Comportamiento De Un Tramo De La Vía Estación Uribe – Tres Puertas Del Departamento De Caldas.", Colombia.

Vásquez Varela, L.R., "Pavement Condition Index (Pci) Para Pavimentos Asfálticos Y De Concreto En Carreteras", Ingeniería De Pavimentos (Ingepav), Manizales, Febrero, 2002.

Vidaña Bencomo, J.O.; "Deterioro En Pavimentos Flexibles De Ciudad Juarez Por Efectos Del Agua Pluvial Pluvial", Universidad Autónoma De Ciudad De Juárez, Septiembre 9, 2005.

Vinson, T.S., Jackson, N.M. And Jung, D.H.; "Thermal Cracking Resistance Of Asphalt Concrete : An Experimental Approach"; 1989.

Villa Lora, O.A.; "Eficiencia De La Tecnica De Sellado De Fisuras En Pavimentos Flexibles", Universidad De Los Andes Facultad De Ingeniería Departamento De Ingeniería Civil Y Ambiental Bogotá D.C., 2007.

Wen, H., Titi, H. y Berry, D; "Study Of rutting and roughness in asphalt overlay and local calibration of roughness prediction model in 2002 design guide"; Transportation Research Board, 2005.

Zhou, F.; Scullion, T.; "Developing An Upgraded Overlay Tester System To Characterize The Reflection Cracking Resistance Of Asphalt Concrete: Summary Report", Texas Transportation Institute, The Texas A&M University System.

Zhou, F.; Scullion, T.; "Developing An Upgraded Overlay Tester System To Characterize The Reflection Cracking Resistance Of Asphalt Concrete: Summary Report"; 2005.

Zhou, F., Scullion, T. Y Williammee, R; "Upgraded TTI Overlay Tester: A Simple Reflective Cracking Simulation Test", Transportation Research Board, 2004.

Zhou F. Y Sun L.; “Mechanistic Analysis Of Reflective Cracking And Validation Of Field Test”; Maastricht, Holanda, 2000.

Zinke, S., Hogge, B., O'brien, C., Mahoney, J., Evaluation Of Pavement Crack Treatments, Literature Review, Connecticut Advanced Pavement Laboratory, Connecticut Transportation Institute, University Of Connecticut, Storrs, Connecticut, Julio 27, 2005.

Zinke, S., Mahoney, J., “Evaluation Of Pavement Crack Treatments”, Connecticut Advanced Pavement Lab – Connecticut Transportation Institute University Of Connecticut, Report No. Jhr 06-305, Connecticut, Febrero 2006.

PÁGINAS WEB

<http://www.huesker.com/espana/presse4.html>

<http://www.asfaltomeros.com/>

<http://icc.ucv.cl/obrasviales/docencia/asfalto.htm>

http://www.geosinteticoslafayette.com/lineas_productos/geosinteticos/estructuras.htm

<http://www.madridiario.es/2007/Diciembre/ciencia-tecnologia/50935/nueva-prueba-fisuras-recrecimientos-asfalticos.html>

http://www.rubberpavements.org/RPA_News/july97/page3.html

http://www.tireindustry.org/features/better_roads.asp